НОВОЕ
В ЖИЗНИ, НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ



В. Б. Брагинский

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

1/1977

СЕРИЯ
ФИЗИКА

НОВОЕ
В ЖИЗНИ, НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ

Серия «Физика»
№ 1, 1977 г.
Издается ежемесячно с 1946 г.

В. Б. Брагинский,
доктор физико-математических наук,
профессор

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»
Москва 1977

53
Б87

Брагинский В. Б.

Б87 Экспериментальная проверка теории относительности. М., «Знание», 1977.

64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Серия «Физика», 1. Издается ежемесячно с 1946 г.)

В брошюре рассказывается о современном состоянии проблемы поисков и изучения гравитационных волн. Обсуждаются перспективы и научные проблемы, связанные с опытами по проверке общей теории относительности (включая «спутниковые» эксперименты и применение планетной радиолокации).
Брошюра рассчитана на широкие круги читателей, интересующихся современной физикой.

Б $\frac{20400-037}{073(02)-77}$ 48—77 53

Введение

Гравитационные явления и их теория занимают особое место в физике по двум причинам.

Первая состоит в том, что гравитационное взаимодействие рекордно слабое. Если расставить в ряд по убывающей «энергоемкости» (по величине дефекта массы) известные физикам виды взаимодействий, то получится такая последовательность: сильное взаимодействие, электромагнитное, слабое и гравитационное. По этой причине экспериментаторам приходилось и приходится преодолевать огромные трудности при реализации опытов, число этих опытов, по сравнению с другими областями физики, относительно невелико, и они реализуются не слишком часто. Обычно подготовка и осуществление современного гравитационного эксперимента занимает несколько лет.

Вторая особенность гравитационного взаимодействия состоит в его универсальности. Иными словами, оно присуще всем известным видам вещества.

Как и всякий вид физического взаимодействия, гравитационное используется во многих современных приборах. Однако следует отметить, что это относится лишь к статическому гравитационному взаимодействию, и основная область применений его — гравиметрия — раздел геофизики, изучающий гравитационное поле Земли и планет.

Этапы экспериментального и теоретического «освоения» классического электромагнитного взаимодействия связаны со следующей последовательностью имен ученых: Кулон (электростатическое взаимодейстзие зарядов), Эрстед, Ампер, Био и Савар (статическое магнитное взаимодействие), Фарадей (электромагнитная

индукция), Максвелл (теория электромагнитных взаимодействий), Герц (обнаружение электромагнитного излучения), Попов (первое использование электромагнитных волн для передачи информации). Если попытаться провести аналогию между этой последовательностью и исследованием гравитационного взаимодействия, то можно сказать, что опытам Кулона соответствуют выполненные практически в то же время опыты Кавендиша, а опытам Эрстеда, проделанным в начале прошлого века, соответствуют несколько экспериментов, часть которых недавно завершена, а часть будет закончена лишь в течение ближайших 5—10 лет. В теоретическом отношении теории Максвелла полностью эквивалентна общая теория относительности Эйнштейна. Что же касается эквивалента опытам Герца, то такового пока нет, хотя очень много сделано для того, чтобы попытаться его реализовать.

Цель этой брошюры — дать читателю представление о том, что такое современные эксперименты по исследованию гравитации, что сделано в этом направлении в течение последних лет, и что планируется сделать в ближайшем будущем.

Принцип эквивалентности

Известны два фундаментальных опытных факта, которые носят названия второго закона Ньютона

$$F = m_{\text{ин}} a,$$

и закона всемирного тяготения Ньютона

$$F_{\text{гр}} = G\frac{m_{\text{гр}1} m_{\text{гр}2}}{R_{1,2}^2}.$$

В первом законе F — сила любого происхождения, во втором законе $F_{\text{гр}}$ — сила взаимного притяжения двух масс, находящихся на расстоянии $R_{1,2}$. Здесь сознательно поставлены индексы к массам: в первом соотношении $m_{\text{ин}}$ — масса инертная, а во втором $m_{\text{гр}}$ — гравитационная. Еще Ньютон обратил внимание на важность вопроса, является ли отношение $m_{\text{ин}}/m_{\text{гр}}$ постоянным для разных тел. Или, иными словами, универсальна ли постоянная тяготения G (ее часто называют кавенди-

шевой гравитационной постоянной). Ньютон показал, что с довольно высокой точностью (для его времени) это так. С тех пор со все возрастающим разрешением опыты ставились и с обычными лабораторными массами, и с элементарными частицами (нейтронами и электронами), и даже с планетами. До настоящего времени все эксперименты дали однозначный ответ: с точностью до ошибок измерений это отношение одно и то же для разных тел. Существует несколько проектов, которые позволяют в принципе еще точнее сравнить отношение $m_{ин}/m_{гр}$ для разных тел. Эти проекты, возможно, будут реализованы в ближайшие несколько лет.

Таким образом, универсальность гравитационного взаимодействия в первую очередь основывается на экспериментально установленном факте постоянства отношения $m_{ин}/m_{гр}$. Если бы хоть малое отклонение было обнаружено, то можно было бы говорить о разных гравитационных зарядах.

Общая теория относительности (ОТО) Эйнштейна основана на постулате, что это отношение точно одно и то же. Отсюда и следовал так называемый принцип эквивалентности гравитацинного поля и поля ускорения, который обычно иллюстрируется невозможностью для экспериментатора, находящегося в лифте, определить, действует ли на лифт гравитационное поле или ускорение лифту сообщают негравитационные силы. Понимая важность этого постулата для ОТО, Эйнштейн подчеркивал, что, с его точки зрения, экспериментаторам важнее лишний раз проверить с большим разрешением этот опытный факт, нежели еще раз проверять эффекты ОТО, проявляющиеся в отклонении света гравитационным полем и во вращении перигелия Меркурия.

Остановимся сначала на двух опытах, один из которых был закончен в 1964 г. в Пристонском университете (США), а второй — в МГУ в 1971 г. В обоих опытах была использована примерно одна и та же схема, а в качестве пробных тел — обычные лабораторные массы. Чтобы понять, как был задуман этот эксперимент, необходимо вспомнить, что гравитационное поле Солнца притягивает Землю, и в результате вместе с Землей мы падаем на Солнце. Однако из-за начальных условий — большой скорости, направленной мимо Солнца, Земля все время «промахивается». В результате такого «про-

маха» и получается примерно круговая орбита, по которой Земля обращается вокруг Солнца. Однако гравитационное ускорение к Солнцу остается. На земной орбите оно составляет примерно 0,6 см/с^2. Теперь представим себе, что на Земле установлен крутильный маятник (рис. 1), на концах коромысла которого укреп-

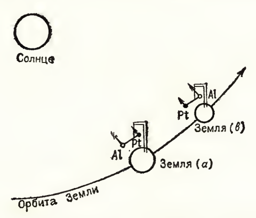


Рис. 1. Схема опыта по проверке принципа эквивалентности

лены две массы, изготовленные из различных веществ. Если ускорения падения на Солнце этих двух масс разные, то крутильный маятник немного развернется (положение *а* на рис. 1).

Из-за вращения Земли через 12 ч массы поменяются местами (положение *в* на рис. 1) и предполагаемая разница в ускорениях развернет маятник на ту же величину, но в противоположную сторону. Таким образом, нарушение принципа эквивалентности должно привести к тому, что такой крутильный маятник будет периодически закручиваться. Период должен составлять 24 ч, а максимальные отклонения наблюдаться в полдень и в полночь. Выбор веществ, из которых следовало изготовить массы, вообще говоря, произволен. Однако как во всех экспериментах такого рода, выполнявшихся прежде, так и в этих двух, были взяты вещества из разных концов таблицы элементов Менделеева. При таком выборе у веществ сильно различается число протонов и нейтронов в ядре, различный дефект масс, раз-

ные скорости электронов на близких к ядру орбитах, и, следовательно, различны релятивистские поправки к массе. В принстонском опыте были выбраны алюминий и золото, в МГУ — алюминий и платина. И в том и в другом опыте не было обнаружено значимого отклонения. В Принстоне было установлено, что относительное различие между ускорениями золота и алюминия, если оно и существует, не может превышать величины $3 \cdot 10^{-11}$ (величины погрешности измерений), а в МГУ было установлено, что такое различие для платины и алюминия не более $1 \cdot 10^{-12}$.

Остановимся коротко на условиях реализации опыта, которые позволили достигнуть такого разрешения. Очевидно, что если предел чувствительности установки составлял $1 \cdot 10^{-12}$, то при полном ускорении 0,6 см/с^2 крутильный маятник должна была закручивать сила с периодом 24 и амплитудой $F_0 = m \cdot 10^{-12} \cdot 0{,}6$ см/с^2, где m — величина массы грузов на концах коромысла. При этом отклонение концов грузов от положения равновесия должно составлять примерно

$$\Delta l \simeq \frac{F_0 \tau_0^2}{4\pi^2 m} = \frac{0{,}6 \cdot 10^{-12} \tau_0^2}{4\pi^2},$$

где τ_0 — период колебаний крутильного маятника.

Приведенное выражение, справедливое при условии, что период τ_0 меньше земных суток, дает первую рекомендацию экспериментаторам: необходимо увеличивать период собственных колебаний. Тогда будет меньше трудностей в создании системы регистрации малых смещений Δl.

В опыте, выполненном в МГУ, величина τ_0 составляла 5ч 20 мин$\simeq 1{,}9 \cdot 10^4$ с (в Принстонском университете — около $4 \cdot 10^2$ с). Этому значению τ_0 соответствовала амплитуда $\Delta l \simeq 5 \cdot 10^{-6}$ см. В реальной схеме измерений вместо двух масс было использовано восемь: четыре из платины и четыре из алюминия. Тем самым ослаблялось влияние операторов, которые могли за счет собственной массы раскачать крутильный маятник. Однако при этом величина Δl, соответствующая чувствительности эксперимента $1 \cdot 10^{-12}$, была несколько меньше. Для регистрации таких небольших колебаний использовался луч гелий-неонового лазера. Луч направлялся на зеркало, укрепленное на коромысле весов, и затем, после

отражения, попадал на барабан с фотопленкой. Для увеличения смещения пятна «световое плечо» лазера было выбрано довольно большим — около 50 м. После проявления пленок оператор определял величину амплитуды колебаний коромысла с периодом, равным земным суткам, и фазой, которой соответствовали бы максимумы в полдень и полночь. Семь таких суточных записей дали такой разброс значений амплитуд, что можно было утверждать, что принцип эквивалентности для платины и алюминия справедлив по крайней мере с точностью до $1 \cdot 10^{-12}$.

Несколько замечаний об условиях реализации такого опыта. Создание системы индикации малых колебаний представляет собой наиболее легкую задачу в опыте. Одной из главных трудностей в нем было преодоление разных видов флуктуаций. Для того, чтобы ослабить тепловые флуктуации, коромысло маятника должно быть помещено в вакуумную камеру с давлением меньше $1 \cdot 10^{-8}$ тор. При этом время затухания составило величину, превышающую два года. Отметим, что использование такого приема не уменьшает среднеквадратичного значения тепловых колебаний маятника (оно зависит от величины затухания), но зато резко «растягивает» случайные отклонения во времени. Поэтому в течение суток из-за тепловых флуктуаций колебания коромысла изменялись на малую величину по сравнению со среднеквадратичным значением (случайные изменения порядка среднеквадратичного происходят за время, равное времени затухания). Из других мер, использованных в этом опыте, нужно отметить тщательную тепловую и магнитную изоляцию, а также выбор материалов, из которых изготовлялось коромысло, с минимальным уровнем магнитных примесей.

Кроме опытов по проверке принципа эквивалентности с использованием лабораторных масс, в последнее десятилетие были с той же целью измерены ускорения свободного падения электронов и нейтронов. Для свободных электронов было получено, что ускорение свободного падения, если оно и отличается от земного, то не более чем на 10%, для свободных нейтронов — не более чем на 5%.

Остановимся коротко на первом из этих экспериментов, который был выполнен американскими физиками Уитерборном и Фэйрбэнком. На первый взгляд кажет-

ся, что достигнутое разрешение 10% не заслуживает даже сравнения с величиной $1 \cdot 10^{-12}$. Действительно, подсчитав разницу во вкладе в общую массу за счет электронов в платине и алюминии, легко видеть, что опыт с крутильным маятником подтверждает справедливость принципа эквивалентности для электронов по крайней мере с точностью 10^{-8}. Иными словами, на семь порядков точнее, чем в опыте Уитерборна и Фэйрбэнка. Однако ценность выполненного ими опыта заключается в том, что это только первый этап. На втором этапе должно быть измерено свободное падение в поле тяжести Земли позитронов — частиц антиматерии, у которых такая же инертная масса, как и у электронов.

Насколько трудно было выполнить такой опыт с электронами, можно судить по следующим простым оценкам. Электрическое поле E, которое может уравновесить гравитационное поле Земли, равно

$$E = \frac{mg}{e} = 6 \cdot 10^{-13} \text{ В/см}.$$

Такую же напряженность электрического поля создает одиночный электрон на расстоянии 5 м. Контактная разность потенциалов между двумя металлами порядка вольта, и в окрестности такого контакта напряженность поля составляет 0,1—0,01 В/см. Таким образом, главная задача в этом опыте состояла в том, чтобы добиться тщательной электростатической экранировки области свободного падения электронов — вплоть до величины порядка $6 \cdot 10^{-14}$ В/см.

Вторая трудность, с которой столкнулись экспериментаторы, — влияние на движение электрона взаимодействия его магнитного момента с неоднородным магнитным полем вблизи установки. Хотя этот эффект и слабее, чем прямое воздействие электрического поля на заряд электрона, но экранировать статическое магнитное поле много сложнее, чем статическое электрическое. Решить эту проблему помогло то, что электроны с двумя определенными квантовыми числами, которым соответствует наименьшая энергия в магнитном поле, движутся медленнее остальных, сильнее увлекаемых магнитным полем. Именно эти электроны и считал счетчик. Отделить медленные электроны от других помогло то обстоятельство, что энергия электрона квантована,

т. е. принимает дискретные значения. Этим значениям соответствуют дискретные величины скоростей, которые электроны набирают в слабонеоднородном магнитном поле.

Таким образом, первая половина эксперимента завершена. Можно надеяться, что в течение ближайших нескольких лет будет выполнена и вторая его часть — проверка принципа эквивалентности для античастиц — позитронов.

Относительно недавно был завершен еще опыт по проверке принципа эквивалентности, в котором в качестве «пробных тел» были использованы Луна, Земля и Солнце. В этом эксперименте принимали участие несколько лабораторий в США. Внешне эксперимент напоминал схему лабораторного опыта, описанного в начале этого раздела, только роль куска платины выполняла Земля, а куска алюминия — Луна. В свободном падении на Солнце эти два «пробных тела» одновременно (опять из-за начальных условий) обращаются вокруг общего центра масс.

Если свободное падение Земли и Луны на Солнце и свободное падение их друг на друга совершаются без нарушения принципа эквивалентности, то изменение расстояния между ними будет точно подчиняться ньютоновской механике с одной и той же гравитационной постоянной G. Вместе с тем расстояние Земля—Луна можно определить очень точно, измеряя время движения лазерного импульса от источника на Земле до уголковых отражателей, оставленных на поверхности Луны советскими лунниками и американскими экспедициями «Аполлон». После того как точность такой лазерной локации достигла нескольких сантиметров, оказалось возможным с большим разрешением проверить принцип эквивалентности для масс Земли и Луны. Специфика этого эксперимента состоит в том, что вклад гравитационной энергии такого тела, как Земля, в ее полную массу относительно велик. Для Земли отошение массы, связанной с ее собственным гравитационным полем, к ее полной массе примерно равно $4{,}6 \cdot 10^{-10}$, для Луны это отношение — $0{,}2 \cdot 10^{-10}$. Для лабораторных масс порядка нескольких граммов это отношение много меньше: оно составляет в зависимости от плотности материала величину порядка 10^{-28}—10^{-29}.

Основной результат эксперимента с Землей, Луной и Солнцем можно сформулировать следующим образом: отношение гравитационной массы, связанной с гравитационным полем Земли, к ее инертной массе такое же, как и у обычных лабораторных тел. Это утверждение справедливо с точностью до ошибки измерений, составившей 1,5%.

В добавление к этому очень краткому описанию эксперимента укажем, что само измерение расстояния Земля—Луна продолжалось в течение четырех лет. При измерениях учитывались неоднородности в распределении масс по объему Луны и Земли, вариации угловых скоростей Луны и Земли, амплитуда приливных волн в земной коре и либрация Луны.

Подводя итоги изложенному, можно сказать, что отношение инертной массы к гравитационной для сильного и гравитационного взаимодействия, с очень высокой точностью одно и то же. До настоящего времени еще не выполнены измерения с антиматерией, хотя косвенные соображения показывают, что и для нее принцип эквивалентности должен быть справедлив. Не прояснен также вопрос о том, выполняется ли принцип эквивалентности для массы, связанной с так называемым слабым взаимодействием.

Дело в том, что соотношение энергий слабого и сильного взаимодействия составляет величину порядка 10^{-14}. и желательно было бы на этом уровне разрешения (или более высоком) проверить постоянство отношения инертной массы к гравитационной. Если сравнить эту величину с достигнутым уровнем $1 \cdot 10^{-12}$ для лабораторных масс, то становится ясно, что необходимо увеличить чувствительность эксперимента по крайней мере на три порядка. Тщательный анализ лабораторных возможностей показал, что в наземной лаборатории такой эксперимент скорее всего невыполним: слишком сильно пришлось бы увеличивать время затухания колебаний маятника, чтобы избавиться от тепловых шумов (при той же температуре нужно увеличить время затухания с двух лет до 2 млн. лет!), слишком много усилий пришлось бы потратить на ослабление сейсмических шумов и т. п.

Однако в космической лаборатории на околоземной орбите такой эксперимент представляется выполнимым.

К середине 1976 г. опубликованы три плана экспе-

риментов такого рода. Основная идея одного из этих планов состоит в следующем: вместо гравитационного поля Солнца при движении на низкой околоземной орбите можно использовать гравитационное поле Земли. Таким образом сразу достигается выигрыш в величине эффекта (если принцип эквивалентности нарушается) более чем на три порядка. Кроме того, вместо механической связи между пробными массами можно использовать более стабильную связь, создаваемую магнитным полем между двумя сверхпроводящими поверхностями. Пробные тела (опять алюминий и золото) должны быть покрыты ниобием (сверхпроводником) и помещены в вакуумную камеру, стенки которой охлаждены до температуры жидкого гелия (4,2 К).

Это краткое описание показывает, что реализация такого эксперимента потребует нескольких лет подготовительной работы на Земле, прежде чем можно будет приступить к его реализации на орбите космической станции.

Спутник, свободный от сноса

Невесомость — один из терминов, которые прочно вошли в обиходный язык со дня первого полета в космос Ю. А. Гагарина. С «гравитационной» точки зрения невесомость — свободное падение в поле тяжести. Причем в таком падении тела имеют практически одно и то же ускорение (в соответствии с принципом эквивалентности), если пренебречь их взаимным гравитационным притяжением. Таким образом, в чистом виде невесомости для двух и более тел нет. Пятитонный космический корабль на расстоянии 3 м будет довольно заметно притягивать космонавта, сообщая ему ускорение около $3 \cdot 10^{-6}$ см/с². За час такое ускорение сместит космонавта примерно на 20 см.

Вместе с тем в однородном гравитационном поле «жесткий» космический корабль (без больших подвижных частей) должен двигаться только по траектории, определяемой гравитационным полем (эта траектория называется геодезической). Однако уже в самом начале развития космонавтики относительно простые измерения показали, что спутники как на околоземных орбитах, так и между планетами движутся по траекториям,

заметно отличающимся от геодезических. Прежде чем рассматривать причины таких отклонений, остановимся на вопросе о том, с какой точностью можно в настоящее время измерить расстояние до спутника.

Измерив время движения радиосигнала от антенны на спутнике до антенны на Земле и умножив его на скорость распространения электромагнитных волн, мы получим величину этого расстояния. Очевидно, что точность определения этого значения прямо пропорциональна точности хранения времени или стабильности частоты задающего генератора. Отсюда и следует простое соотношение для двух относительных погрешностей в определении частоты f и расстояния L:

$$\frac{\Delta f}{f} \simeq \frac{\Delta L}{L}.$$

Величина $\Delta f/f$, так же как и $\Delta L/L$, может иметь разный смысл. Если нас, например, интересуют все значащие числа в величине L, то тогда важна абсолютная (метрологическая) стабильность частоты радиогенератора $(\Delta f/f)_1$. Лучшему из существующих эталонов частоты — водородному стандарту — соответствует $(\Delta f/f)_1 \simeq 5 \cdot 10^{-13}$. Если же в конкретной схеме опыта экспериментатора интересует не точное значение всей длины L, а лишь ее изменение, то важна кратковременная стабильность частоты $(\Delta f/f)_2$, которую иногда называют квазистатической или технической. Лучшие современные микроволновые генераторы, стабилизированные резонаторами из сверхпроводника — ниобия, помещенного в жидкий гелий, — имеют величину $(\Delta f/f)_2 \lesssim 3 \cdot 10^{-16}$ за 10^3 с.

Этих двух оценок вполне достаточно, чтобы понять, сколь точно можно сейчас измерить растояние и его вариации. Если $L = 300$ млн. км $= 3 \cdot 10^{13}$ см, то величина $(\Delta L)_1 \simeq 15$ см, а $(\Delta L)_2 \simeq 1 \cdot 10^{-2}$ см. Реальные работающие радиодальномеры дают несколько худшие значения: $(\Delta L)_1 \simeq 10^2$ см, а $(\Delta L)_2 \simeq 4$ см при времени усреднения около 1 мин.

Если сравнить эти цифры с приведенной оценкой для смещения, вызываемого ускорением $3 \cdot 10^{-6}$ см/с^2, то становится ясно, что с Земли можно за полчаса — час без труда определить абсолютное значение ускорения на уровне $a \simeq 10^{-5}$ см/с^2, а относительное — по крайней мере на уровне $a \simeq 10^{-6}$ см/с^2. При увеличении времени на-

блюдения соответственно возрастет и точность в определении ускорения.

Напомним, что на орбите Земли вокруг Солнца ускорение под действием гравитационного поля Солнца составляет 0,6 см/с^2, а на близкой околоземной орбите — 980 см/с^2.

Как уже отмечалось выше, траекторные измерения показали, что спутники движутся по орбитам, сильно отличающимся от геодезических. Можно описать эти отклонения в единицах ускорений. Для околоземных спутников с низкими орбитами, задевающими верхние слои атмосферы, негравитационное ускорение составляет величины порядка $3 \cdot 10^{-4}$ см/с^2, а для спутников с высотой орбиты более 500 км — соответственно 10^{-6}—10^{-7} см/с^2.

Перечислим основные причины, вызывающие «негеодезичность» траектории спутника.

1) Торможение спутника в верхних слоях атмосферы. Если площадь спутника $2 \cdot 10^4$ см^2, масса 200 кг и высота круговой орбиты 400 км, то $a_{атм} \simeq 3 \cdot 10^{-4}$ см/с^2.

2) Давление солнечного излучения.

При площади спутника $2 \cdot 10^4$ см^2, массе 200 кг и расстоянии от Солнца, равном расстоянию Солнце—Земля, величина $a_{солн.\, давл} \simeq 3 \cdot 10^{-6}$ см/с^2.

3) Давление солнечного ветра.

При тех же параметрах спутника на орбите Земли $a_{солн.\, ветра} \simeq 2 \cdot 10^{-8}$ см/с^2.

4) «Отдача» излучения микроволнового передатчика.

Обычно на спутнике имеется антенна с узкой диаграммой направленности и один или несколько передатчиков с мощностью в несколько ватт. Излучение электромагнитной мощности в одном направлении приводит к тому, что антенна, а с ней и весь спутник испытывают силу «отдачи» $F = 2W/c$, где W — мощность излучения, а c — скорость света. Отсюда возникает ускорение $a_{отдачи} = F/m$. Если $W = 10$ Вт, а $m = 200$ кг, то $a_{отдачи} \simeq$ $\simeq 3 \cdot 10^{-8}$ см/с^2.

5) Давление от ударов микрометеоритов.

Измерения, проделанные группой советских физиков во главе с Б. П. Константиновым, показали, что удары крупных микрометеоритов весьма редки. Например, удары микрометеоритов с массой 10^{-12} г при площади спутника $S = 2 \cdot 10^4$ см^2 можно ожидать в среднем один раз в 10^2 с. При скорости микрометеорита $3 \cdot 10^6$ см/с^2

и массе спутника $m=2\cdot10^5$ г, усредненные вариации ускорения $a_{метеорит}\simeq1\cdot10^{-13}$ см/с^2.

6) Неоднородное магнитное поле.

Наличие неоднородного магнитного поля вызывает пондеромоторную силу, создающую ускорение $a_{магн}$. Если средняя плотность спутника 1 г/см^3 и он изготовлен из неферромагнитных материалов с проницаемостью $\sim10^{-6}$, то на околоземных трассах $a_{магн}\simeq5\cdot10^{-18}$ см/с^2, а на гелиоцентрических $a_{магн}\simeq10^{-26}$ см/с^2.

Как видно из этого перечня, первые пять сил, вызывающих негравитационные ускорения спутника, являются поверхностными силами. Это значит, что тело, помещенное внутрь спутника (если пренебречь на время собственным гравитационным полем спутника), будет стремиться, до первого касания, двигаться по траектории, существенно более близкой к геодезической, чем сам спутник. Спутник можно сделать возможно более гравитационно-симметричным, т. е. добиться того, чтобы в небольшой области внутри него гравитационное поле было почти скомпенсировано. Если поместить туда пробное тело, окруженное бесконтактными датчиками малых смещений, которые управляют тягой реактивных микродвигателей, то такой спутник будет в целом двигаться, повторяя движение пробного тела, поскольку все поверхностные силы, которые «сносят» его с геодезической траектории, будут скомпенсированы тягой микродвигателей. Такой спутник и был назван спутником, свободным от сноса (рис. 2).

Совершенно ясно, что для прецизионных измерений гравитационного поля Солнца и планет такие спутни-

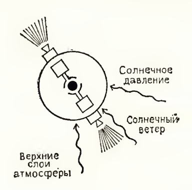


Рис. 2. Принципиальная схема спутника, свободного от сноса

ки незаменимы. Более подробно на разнообразных их применениях мы остановимся ниже.

Первый такой спутник (он назывался «Трайяд-I», см. рис. 3) был запущен учеными США в 1972 г. и испытывался в течение целого года. Для того чтобы уменьшить величину $a_{магн}$, которое свойственно самому

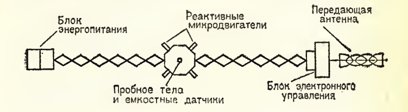


Рис. 3. Конструкция спутника «Трайяд-I»

пробному телу и не может быть скомпенсировано следящей системой, пробное тело было изготовлено из сплава платины и золота — двух материалов, обладающих диа- и парамагнитными свойствами. В результате суммарная магнитная проницаемость пробного тела оказалась на два порядка меньше, чем у обычных неферромагнитных тел.

Испытания, проведенные с «Трайядом-I», показали, что уровень компенсации негравитационных ускорений достиг величины 10^{-8} см/с^2. Высота спутника орбиты над поверхностью Земли была около 800 км. Это означает, что уровень компенсации негравитационных ускорений доходил до 0,1%, что дало возможность с точностью до 100 м прогнозировать местоположение спутника на орбите на две недели вперед. Для обычных спутников на таких высотах суточная поправка составляет сотни метров. Таким образом, спутники, свободные от сноса, могут служить хорошими навигационными ориентирами.

Остановимся коротко на основных требованиях, которые предъявляются к конструкции спутника, свободного от сноса.

а) Уровень «гравитационной симметрии».

Небольшая масса (порядка 40 г), расположенная на расстоянии полуметра от пробного тела и не уравновешенная другой, расположенной симметрично, вызовет

ускорение пробного тела около 10^{-9} см/с^2, которое не может быть скомпенсировано микродвигателями.

б) Требования к температурной стабилизации и вакууму внутри спутника.

Пробное тело подвергается воздействию поверхностных сил. Однако эти силы «внутреннего» происхождения, иными словами, они вызваны физическими условиями внутри спутника. К таким силам относятся давление теплового излучения, если внутри камеры, где расположено пробное тело, есть разница в температуре стенок. К таким силам относится также радиометрическое давление, вызванное остаточным газом и разницей температур стенок камеры. Чтобы эти две силы не создавали ускорения пробного тела, превышающего $1 \cdot 10^{-9}$ см/с^2, необходимо, чтобы разница в температуре стенок не превышала 0,1° С, а давление — 10^{-6} тор, если пробное тело — шар с радиусом 3 см и плотностью 20 г/см^3.

Мы не будем останавливаться здесь на других требованиях, предъявляемых к такому устройству, таких, как допустимое натекание электрического заряда на пробное тело или требования к датчикам малых смещений. Очевидно, что для создания такого спутника требуется разрешить сложные технические проблемы. Однако расчеты показывают, что вполне достижимым в ближайшие годы является уровень компенсации негравитационных ускорений, примерно равный 10^{-10} см/с^2.

Перейдем теперь к задачам, которые могут быть решены с использованием спутников, свободных от сноса. Прежде всего — это точное определение распределения масс внутри Земли. Детальные измерения элементов траектории спутников вместе с заранее гарантированным отсутствием (в определенном приближении) негравитационных ускорений, дает возможность определить локальные вариации ускорения силы тяжести вблизи Земли. Причем таким методом можно составить карту распределения земного гравитационного поля существенно более точно, чем перенося гравиметры с места на место по земной поверхности. Действительно, хороший современный гравиметр обеспечивает точность определения земного ускорения порядка 10^{-9} относительной величины, а даже первый спутник, свободный от сноса, имел негравитационное ускорение 10^{-8} см/с^2, что соответствует 10^{-11} от величины земного ускорения. Именно поэтому, с помощью «Трайяда-I»

была почти на порядок уточнена одна из моделей распределения масс в Земле.

С помощью спутников, свободных от сноса, может быть выполнен целый класс релятивистских гравитационных экспериментов. О них будет рассказано далее.

Кроме гравитационных задач, с помощью спутников, свободных от сноса, можно решать и другие, негравитационные задачи. Однако их рассмотрение выходит за рамки этой брошюры.

Проверка общей теории относительности

1. ВРАЩЕНИЕ ПЕРИГЕЛИЕВ ПЛАНЕТ

Основные положения ОТО были сформулированы Эйнштейном 60 лет назад. Практически сразу же после появления первой его статьи были начаты экспериментальные исследования с целью проверки эффектов, предсказываемых этой теорией. Собственно, один из этих экспериментов существовал задолго до того, как ОТО была сформулирована: только на основании закона всемирного тяготения Ньютона астрономы не могли объяснить явление монотонного сдвига перигелия планеты Меркурий. Согласно ОТО этот эффект должен иметь место. За один оборот перигелий должен смещаться (в угловых единицах) на величину ε, равную

$$\varepsilon = \frac{6\pi G M_{\odot}}{c^2 \hat{a}(1-l^2)} .$$

В этом выражении $M_{\odot}$ — масса Солнца, c — скорость света, l — эксцентриситет орбиты, $\hat{a}$ — большая полуось орбиты. Если подставить в это выражение численные значения, а затем по величине ε вычислить, на сколько угловых единиц сместится перигелий планеты за 100 лет, то величина эффекта ОТО будет для Меркурия — 43,03 угл. с, Венеры — 8,63 угл. с, Земли — 3,8 угл. с.

Многократные измерения, проделанные астрономами, показали, что измеренное значение для Меркурия совпадает с предсказанной ОТО величиной с точностью до ошибок измерений, а последние меньше 1%.

Это очень хорошее согласие неоднократно подвергалось проверке. Относительно недавно было высказано предположение, что сплюснутость Солнца может дать значительную коррекцию величины ε, и тогда наблюдательные данные не будут подтверждать ОТО. Выполненные в 1974 г. американским физиком Хиллом измерения показали, что если сплюснутость Солнца и есть, то ее величина настолько мала, что не может внести существенной поправки в величину ε.

Появление искусственных спутников вызвало надежду повысить разрешение в таком эксперименте. Действительно, можно запустить гелиоцентрический спутник с орбитой, имеющей более «подходящие» $\hat{a}$ и l, в результате чего величина ε увеличится в десятки раз, а использование радиодальномеров позволит измерять ε точнее. Однако если $\hat{a}$ есть величина порядка расстояния Земля—Солнце, а негравитационное ускорение, вызванное одной из поверхностных сил, порядка 10^{-6} см/с², то положение перигелия может сместиться на единицы угловых секунд за год. Таким образом, спутник обязательно должен быть свободным от сноса. Детальные расчеты показали, что для существенного повышения разрешения по сравнению с 1% — достигнутой в астрономических наблюдениях величиной, необходимо сделать спутник с компенсацией негравитационных ускорений на уровне 10^{-10} см/с². Это на два порядка лучше, чем у спутника «Трайяд-I», о котором шла речь в предшествующем разделе. До настоящего времени, однако, в периодической печати не было сообщено о начале каких-либо конкретных разработок в этом направлении с объявленной программой запуска.

2. КРАСНО-ГОЛУБОЕ СМЕЩЕНИЕ ЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Изменение частоты электромагнитного излучения в гравитационном поле является также следствием ОТО. Этот эффект описывается простым выражением

$$\left(\frac{\Delta f}{f}\right)_{\text{гр}} = \frac{\Delta\varphi}{c^2},$$

где $(\Delta f/f)_{\text{гр}}$ — относительное изменение частоты электромагнитного излучения, $\Delta\varphi$ — разница гравитационных потенциалов, c — скорость распространения света.

Если фотоны движутся в направлении гравитационного поля, то величина $(\Delta f/f)_{гр}$ положительна, и соответственно происходит повышение частоты (фотоны становятся «голубее»). Если фотоны движутся против гравитационного поля, $(\Delta f/f)_{гр}$ отрицательна, т. е. частота понижается. Фотоны при этом становятся «краснее». Отсюда и название явления: красно-голубое смещение.

Вблизи поверхности Земли $\Delta\varphi = gH$, где g — ускорение свободного падения, H — разность высот. Если $H = 20$ м, то $(\Delta f/f)_{гр} = 2 \cdot 10^{-15}$. Из этой оценки ясно, что, только располагая генератором электромагнитных колебаний высокой стабильности и соответствующим приемником, можно в земных условиях наблюдать этот эффект.

Открытие высокой стабильности излучения ядрами некоторых изотопов мягких γ-квантов (эффект Мессбауэра) позволило надежно проверить этот эффект на Земле. В качестве приемника в таком эксперименте использовались ядра, обладающие очень узкой линией поглощения. Первый опыт был выполнен в 1960 г. Измерения дали значение $(\Delta f/f)_{гр}$, совпадающее с величиной $\Delta\varphi/c^2$ с точностью до ошибок измерений (около 5%). К настоящему времени полученное разрешение достигло величины 1%. Возможно, что в течение ближайших лет удастся выиграть еще один-два порядка в той же схеме измерений. Такое последовательное повышение точности измерений достигается устранением погрешностей, вносимых различными частями установки. Так, например, разница в температуре источника и приемника в 1° С вызывает сдвиг частоты линии излучения ядер примерно на такую же величину, что и ожидаемый эффект. Поэтому даже в первом (грубом) измерении уже нужно было контролировать температуру с точностью до 0,03° С, а затем вводить поправку, которая составляла десятки процентов от измеряемой величины.

Очевидно, что если есть возможность проводить контроль частоты электромагнитного излучения несколько раз за время измерения, то для экспериментатора важна не метрологическая стабильность $(\Delta f/f)_1$, а квазистатическая $(\Delta f/f)_2$. Для современных водородных стандартов $(\Delta f/f)_2 \simeq 2 \cdot 10^{-15}$ за время порядка 10^3 с. Поэтому в ближайшие один-два года предполагается сделать попытку существенно повысить точность изме-

рения этого эффекта, поместив водородный стандарт на борт ракеты и подияв его иа высоту порядка 100 км. Второй стаидарт (с которым будет проводиться сравнение) останется иа Земле. Разиости высот в 100 км соответствует $gH/c^2 \simeq 10^{-11}$. Таким образом, можно иадеяться, что этот эффект будет еще раз провереи с точиостью относительиой погрешиости $3 \cdot 10^{-2}$—$1 \cdot 10^{-2}$%.

3. ОТКЛОНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ СОЛНЦА

Из ОТО следует, что гравитационное поле искривляет оптические лучи, воздействуя иа иих, как среда с показателем преломления, превышающим единицу. Если электромагиитиая волиа от отдалеиного источника проходит вблизи Солнца, то его гравитациоиое поле должно отклоиить фроит волны (рис. 4) иа угол Θ, равный

$$\Theta = \frac{4GM_C}{cR} \simeq 1{,}75 \frac{R_C}{R} \text{ угл. с,}$$

где R_C — радиус Солнца, R — прицельное расстояние.

Этот эффект иеоднократно измеряли во время солнечных затмений, сопоставляя на фотопластинках положения звезд вблизи диска Солнца во время затмеиия и через полгода после иего. Согласно полиой сводке даииых, получеиных разиыми авторами и собраииой со-

Рис. 4. Отклоиеиие фронта волны в гравитационном поле Солица:
а — истинное положеиие источника; *в* — иаблюдаемое наземным иаблюдателем

ветским астрономом академиком А. А. Михайловым (который также принимал участие в таких измерениях), разброс экспериментальных данных качественно подтверждал величину эффекта, но отклонения достигали 30—40% относительной величины.

Сравнительно недавно благодаря успехам техники радиоастрономических наблюдений оказалось возможным проделать уже количественную оценку эффекта, но не в оптическом диапазоне длин волн, а в сантиметровом. Измерения удалось провести, используя несколько ярких радиоисточников, которые являются затменными. К ним относятся, в частности, и знаменитый у радиоастрономов источник 3С 279.

Для того, чтобы получить хорошее угловое разрешение, необходимо было использовать два радиотелескопа в синхронном режиме. При расстоянии между двумя радиотелескопами $D=3$ км и при использовании приемника на длине $\lambda=3$ см ширина совместной диаграммы равна примерно $\lambda/D\simeq10^{-5}$ рад $\simeq$ 2 угл. с. Однако такая ширина диаграммы дает возможность определить угловое положение источника очень точно. Такие измерения были проведены независимо в нескольких лабораториях мира. Ни в одном из них не было получено отклонений наблюденных величин от предсказанного значения 1,75 угл. с., выходящих за пределы ошибок измерений. Наименьшее значение ошибки измерений составляло 2% от 1,75 угл. с.

В ближайшие годы можно ожидать повышения разрешения этого эксперимента за счет увеличения базы— расстояния между синхронно работающими радиотелескопами.

4. ЗАДЕРЖКА ИМПУЛЬСА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ СОЛНЦА

Кроме отклонения фронта электромагнитной волны, гравитационное поле Солнца создает дополнительную задержку Δt длительности движения импульса от источника до наблюдателя. В соответствии с ОТО эта дополнительная задержка равна

$$\Delta t\simeq \frac{GM_{\text{C}}}{c^3} \ln \frac{r_0+r_1+\rho}{r_0+r_1-\rho} ,$$

где r_0 — расстояние между Солнцем и источником, r_1 — расстояние Земля—Солнце и ρ — расстояние источник—Земля. Очевидно, что величина Δt тем больше, чем ближе геометрическая прямая источник — Земля проходит вблизи края Солнца. Если источник находится на орбите Марса, то наибольшая величина Δt будет порядка 200 мкс. Такой задержке соответствует «дополнительная» длина пути импульса в 60 км. Если вспомнить оценки точности при определении расстояния до спутника (метрологическая точность около 1 м), то при таких измерениях следовало бы ожидать точности $1{,}6 \cdot 10^{-3}\%$ от величины эффекта задержки. Однако наивысшая точность, достигнутая сейчас (группой профессора Шапиро из Массачузетского технологического института), составляет, так же как и в измерениях эффекта отклонения фронта, только 2%. Причина заключается в том, что в измерения необходимо вносить значительную поправку на задержку электромагнитного сигнала в солнечной короне. Неполная информация о свойствах околосолнечной плазмы и привела к такой погрешности измерений. Уменьшить погрешность можно, используя две синхронные частоты от помещенных на борт спутника двух когерентных источников. Измерения на двух частотах в принципе позволяют по крайней мере на порядок уменьшить величину поправки на влияние околосолнечной плазмы и, соответственно, довести точность измерения эффекта задержки до 0,1—0,3%.

Следует подчеркнуть, что во всех измерениях, проделанных независимо в разных лабораториях, величина эффекта задержки с точностью до ошибок измерений совпадает с теоретическим значением, предсказанным ОТО.

Подводя итог этому краткому перечню проделанных измерений, можно сделать однозначное заключение о том, что по крайней мере в неволновой зоне и для не слишком больших значений величин $\Delta\varphi/c^2$ общая теория относительности находится в очень хорошем согласии с экспериментальными результатами. Более того, для дальних космических полетов ОТО, по существу, стала чем-то вроде инженерной дисциплины для вычисления навигационных поправок к траекториям.

Однако интерес к другим возможным экспериментам по проверке эффектов ОТО не исчез. Дело в том, что в принципе можно создать теорию, еще более общую,

чем общая теория относительности. Эта теория для других эффектов, еще не подвергавшихся экспериментальной проверке, может дать численные значения, отличные от предсказанных ОТО. Поэтому в настоящее время и ведется подготовка к проведению нескольких опытов, о которых речь пойдет ниже.

5. СПИН-СПИНОВОЕ ГРАВИТАЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Гравитационное взаимодействие вращающихся массивных тел (условно названное в заголовке этого параграфа спин-спиновым) представляет собой, согласно ОТО, релятивистский эффект второго порядка, так же как и взаимодействие токов в электродинамике. До настоящего времени из-за малости этого эффекта он никем не наблюдался. Только в 1959 г., через два года после запуска первого в мире искусственного спутника Земли, американский физик Шифф предложил вариант эксперимента, в котором можно было надеяться обнаружить этот эффект. Однако пока этот эксперимент еще не осуществлен, хотя для его подготовки сделано уже очень много.

Идея Шиффа заключается в том, чтобы вывести на полярную орбиту вокруг Земли высокочувствительный гироскоп. Согласно вычислениям, гироскоп должен прецессировать:

$$\vec{n}^{(1)} = \frac{GI\omega}{2c^2a^3(1-e^2)^{3/2}}\left\{[\vec{n}^{(2)}\times\vec{n}^{(1)}] + 3[\vec{n}^{(2)}\times\vec{n}][\vec{n}^{(1)}\times\vec{n}]\right\}.$$

В этом выражении $I\omega$ — угловой момент вращения Земли, a — половина большой оси орбиты, e — эксцентриситет орбиты, $\vec{n}$, $\vec{n}^{(1)}$ и $\vec{n}^{(2)}$ — единичные векторы, определяющие соответственно ось орбиты, ось гироскопа и ось вращения Земли, c — скорость света.

Выделим два случая: ось гироскопа параллельна *1* и перпендикулярна *2* оси вращения Земли (рис. 5). Если в уравнение Шиффа подставить численные значения для полярной орбиты спутника с удалением от поверхности около 500 км, то можно получить две величины скорости прецессии гироскопа:

для случая 1 — 6,9 угл. с./г. («спин-орбитальный эффект»),

для случая 2 — 0,05 угл. с./г. («спин-спиновый эффект»).

Эти оценки показывают, насколько трудно выполнить такой эксперимент. Во-первых, спутник, на котором будет установлен гироскоп, должен быть свободным от сноса. Во-вторых, стабильность оси гироскопа должна быть не хуже чем 0,001 угл. с./г. В-третьих, угловая стабилизация самого спутника (или по крайней мере той его части, в которой происходит измерение угловых координат гироскопа) также должна быть на уровне 0,001 угл. с./г.

Эти три требования должны выполняться на орбите по крайней мере в течение нескольких месяцев, необходимых для того, чтобы проделать измерения.

С момента опубликования Шиффом статьи о релятивистском гироскопе (так обычно называют этот эксперимент) в одной из лабораторий Стэнфордского университета (США) выполнена большая подготовительная работа и проведены наземные испытания, однако первый запуск спутника с несколькими гироскопами на борту состоится, по-видимому, не ранее, чем через 2—3 года.

Рис. 5. Прецессия релятивистского гироскопа

На рис. 6 схематически представлено устройство спутника, предназначенного только для проверки этого эффекта. Основная его часть — блок с несколькими одинаковыми гироскопами. Каждый из них представляет собой очень однородную сферу из плавленного кварца (около 4 см в диаметре), покрытую сверхпроводником — ниобием. Для того, чтобы исключить появление моментов, связанных с отличным от нуля квадрупольным моментом сферы и внутренними градиентами гравитационного поля самого спутника (эти моменты тоже вызывают прецессию), кварцевая сфера должна отвечать очень жестким требованиям. Допустимая относи-

тельная неоднородность кварца в сфере и допустимая несферичность не должны превышать $1 \cdot 10^{-6}$.

Гироскопы с помощью следящей электростатической системы подвешены внутри блока (также кварцевого). Сферы раскручиваются примерно до 300 об/с струями газообразного гелия, затем струи выключаются, объем вокруг сфер откачивается до глубокого вакуума, а сама камера охлаждается до температуры жидкого гелия. Интересно отметить, что постоянная времени затухания такого гироскопа должна быть около 300 лет.

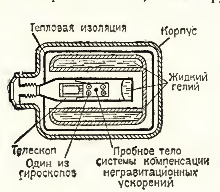


Рис. 6. Принципиальная схема спутника для измерения релятивистской прецессии гироскопа

Для съема информации о положении оси гироскопа предложено изящное решение. Вращающийся сверхпроводник должен обладать магнитным моментом, пропорциональным угловой скорости вращения (эффект Лондона). Несколько чувствительных магнетометров, основанных на эффекте Джозефсона, располагаются вокруг сфер. Информация о магнитном поле, получаемая от них, должна позволить измерить положение оси вращения гироскопа с точностью до 0,001 угл. с.

Телескоп, с помощью которого ось спутника ориентируется на одну из ярких звезд, располагается прямо на блоке с гироскопами и, следовательно, тоже имеет температуру жидкого гелия. Сигналы с телескопа должны управлять реактивными микродвигателями угловой ориентации. Корпус телескопа, его линзы и призмы, разделяющие лучи для датчиков управления, изготовляются из плавленного кварца и соединяются на оптическом контакте (без клея или металлических стяжек).

Это краткое описание показывает, как непросто выполнить такой опыт, и сколько труда и изобретательности он требует от экспериментаторов.

В начале 1976 г. в периодической печати появилось еще одно предложение (принадлежащее Ван Паттену и

Эвериту) новой схемы опыта, в котором можно наблюдать эффект, сходный с эффектом Шиффа. Еще в 1918 г. Лензе и Тиринг указали, что гравитационное поле вращающегося тела должно увлекать окружающие тела за счет релятивистского гравитационного взаимодействия. Этот эффект, так же, как и прецессия релятивистского гироскопа, невелик. Ван Паттен (один из создателей спутника «Трайяд-I») и Эверит (работающий над релятивистским гироскопом) подсчитали, что орбиты двух спутников (рис. 7), выведенных на близкие полярные

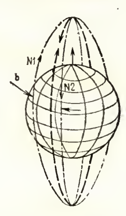


Рис. 7. Сдвиг орбиты спутников № 1 и № 2 из-за вращения Земли; величина $b=13{,}9$ м через 2,5 года свободного вращения спутников

орбиты вокруг Земли, должны постепенно расходиться, если спутники на орбитах имеют противоположно направленные скорости. За 2,5 года в районе экватора расхождение между орбитами должно составлять около 14 м. Эта оценка указывает, что проделать такое измерение непросто, если учесть, что прогнозировать положение спутника «Трайяд-I» на орбите можно лишь на две недели вперед, и то с ошибкой около 100 м. Однако поскольку спутники имеют близкие начальные и конечные орбиты и если они идентичны, должны испытывать примерно одни и те же негравитационные ускорения, есть надежда на успех эксперимента.

6. ПОПЫТКИ ОБНАРУЖИТЬ НЕЭЙНШТЕЙНОВСКИЕ ГРАВИТАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ

В 1937 г. Дирак высказал идею о переменности G — гравитационной постоянной общей теории относитель-

ности. Согласно его вычислениям, относительное изменение гравитационной постоянной может быть порядка $3 \cdot 10^{-11}$ за год. Для экспериментаторов это означает, что на таком уровне должны изменяться орбиты планет и спутников и периоды их обращения.

Если учесть, что относительная точность измерения расстояний и интервалов времени равна относительной величине стабильности частоты, достигшей $5 \cdot 10^{-13}$ (в данном случае речь идет о стабильности воспроизведения или метрологической стабильности), то становится очевидно, что проверка гипотезы Дирака вполне выполнима. Необходимо только собрать достаточное количество информации об орбитах и периодах обращения планет и спутников, а также тщательно учесть все поправки на возмущение орбит за счет их взаимного чисто ньютоновского влияния.

Наблюдения, проделанные экспериментаторами из Массачузетского технологического института (США), показали, что если изменение гравитационной постоянной и имеет место, то оно не превосходит относительной величины $6 \cdot 10^{-11}$ за год. По-видимому, через 3—4 года за счет накопления информации будет достигнут уровень разрешения $1 \cdot 10^{-11}$ в год.

Неэйнштейновские релятивистские гравитационные теории, которые действительно могут конкурировать с ОТО, предсказывают эффекты практически такой же величины, что и теория Эйнштейна. Эти эффекты по порядку величины в v^2/c^2 или $\Delta\varphi/c^2$ меньше смещений, сил и т. д., вычисленных на основании чисто ньютоновских уравнений (Δv — разница скоростей двух гравитирующих тел, $\Delta\varphi$ — разница гравитационных потенциалов между двумя точками).

Итальянским физиком Коломбо и Бертотти принадлежит идея проверить эффект красно-голубого смещения частоты с помощью спутника со стабильным генератором на борту, орбита которого проходит на расстоянии 10 солнечных радиусов от поверхности Солнца. Современного уровня стабильности частоты вполне достаточно для того, чтобы, используя огромную величину $\Delta\varphi$ между орбитами Земли и такого спутника, измерить смещение частоты в гравитационном поле на уровне $(\Delta\varphi/c^2)^2$. Можно надеяться, что такой опыт будет реализован в течение ближайших 7—8 лет.

7. ПЕРСПЕКТИВЫ ДЛЯ НАЗЕМНЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ НЕВОЛНОВЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Все эксперименты, описанные в этом разделе, посвященном непосредственной проверке ОТО, связаны с использованием либо огромной массы Солнца (вращение перигелиев планет, отклонение и задержка фотонов), либо также довольно большой массы Земли (прецессия гироскопа Шиффа, увлечение орбиты спутника). Можно сказать, что экспериментаторы делали те эксперименты, которые можно было относительно легко выполнить с помощью уже существовавших методов измерений. К этому можнс добавить, что в планируемых экспериментах ясно просматривается возможность их реализации при усовершенствовании известных методов. При этом во всех известных случаях для облегчения решения экспериментальной задачи использовалось или предполагается использование огромного гравитационного поля Солнца или Земли. Такое стремление экспериментаторов идти «по пути наименьшего сопротивления» оправдывается, с одной стороны малостью эффектов, а с другой — желанием измерить эффекты с возможно большей точностью. Последнее обстоятельство особенно важно, так как речь идет о численной проверке ОТО.

Возможна постановка такого вопроса: является ли логически полной программа экспериментов (выполненных и планируемых) по проверке ОТО? Иными словами, сколько и какие качественно разные измерения нужно проделать для того, чтобы утверждать, что вся общая теория относительности справедлива. Как всякая физическая теория, ОТО имеет определенные границы, внутри которых она может быть справедлива с очень высокой степенью точности. Эти границы, как и для других физических теорий, по-видимому, связаны с полнотой самих уравнений. Возможно, например, что необходимо при достижении достаточно высокого уровня точности измерений использовать другие уравнения, отличающиеся от эйнштейновских дополнительными членами. Во всяком случае значительное число физиков-теоретиков считает, что ОТО, будучи макроскопической теорией, не может быть без дополнительного «усовершенствования» применена к квантовым гравитационным

явлениям, если мы имеем дело с сильным гравитационным полем (когда $\Delta\varphi \simeq c^2$). Но даже в чисто макроскопическом случае можно создать логически стройную последовательность уравнений, которые приближенно совпадают с уравнениями Эйнштейна и предсказывают близкие (но отличные) численные значения результатов наблюдений. Естественно, что такая неэйнштейновская теория может предсказывать и другие эффекты, которых в ОТО нет. Очевидно, что только в сравнении с такими теориями и можно говорить о логической полноте списка экспериментов, необходимых для полной проверки ОТО в рамках макроскопических явлений.

Подавляющее большинство физиков-теоретиков считает ОТО верной, поскольку ее предсказания отличаются от экспериментальных результатов не более чем на ошибки измерений, которые составляют проценты от величин наблюдаемых эффектов. Вместе с тем теоретики считают целесообразной постановку новых экспериментов, в которых ошибки измерений составляли бы все меньшие и меньшие величины относительно измеряемых, а также экспериментов, в которых делались бы попытки обнаружить эффекты, не вытекающие из ОТО, но являющиеся следствием других релятивистских гравитационных теорий. Обобщением таких неэйнштейновских макроскопических релятивистских теорий является так называемый постньютоновский параметризованный формализм, созданный американскими теоретиками Уиллом, Нордтведтом и Торном. Он представляет собой систему уравнений с 20 безразмерными параметрами. Если предположить, что ряд этих параметров тождественно равен единице, а остальные нулю, то мы получим только уравнения ОТО. В постньютоновский параметризованный формализм «заложены» такие неэйнштейновские идеи, как возможное нарушение принципа эквивалентности (правда, в очень высоких порядках), существование избранной системы координат (т. е. влияние распределения массы во Вселенной на локальное гравитационное взаимодействие — естественно, также очень небольшой эффект) и т. п. С точки зрения этого формализма необходимо проверять в экспериментах все 20 параметров. Относительно малая часть их проверена в уже выполненных опытах, которые кратко описаны выше. Тем не менее, с точки зрения теоретиков, дело не может кончиться установлением факта, что

часть параметров приближенно равна единице (например, с точностью до 0,001), а другая равна нулю (с такой же точностью), и работа экспериментаторов будет считаться завершенной. Ни для какой физической теории такое положение не может считаться естественным. Граница точности измерений таких параметров 10^{-3} или меньшая просто будет означать границу применимости ОТО (или другой более общей теории гравитационных взаимодействий, которая ее заменит). Для следующего этапа развития теории гравитации нужны именно опытные факты, которые не описываются известными теориями и, следовательно, являются «хлебом» для теоретиков.

После такого краткого отступления, вернемся к чисто экспериментальным проблемам и рассмотрим возможности реализации релятивистских гравитационных опытов в наземной лаборатории. Такого рода опыты обладают в одном отношении несомненными преимуществами, так как у операторов есть взоможность несколько раз повторить измерения и, кроме того, в деталях исследовать влияние разных параметров установки на результаты измерений, если возникает подозрение на имитацию ожидаемого результата за счет каких-либо неучтенных эффектов. В этом разделе мы рассматриваем только релятивистские гравитационные эффекты в неволновой зоне, иными словами, когда расстояния между взаимодействующими телами существенно меньше c/ω или $c\tau$, где ω — характерная частота модуляции эффекта, а τ — время взаимодействия. Эксперименты в волновой зоне будут рассмотрены в следующем разделе.

Предварительно остановимся на вопросе: какое наименьшее ускорение может быть в принципе измерено в лабораторных условиях. Предположим, что удалось полностью избавиться от сейсмических и акустических помех, термостабилизировать установку настолько, что температурные флуктуации не сказываются на результатах измерений, и т. п. Будем считать, что в нашем распоряжении имеется крутильный маятник, подобный описанному в первом разделе, и что единственным флуктуационным процессом, вызывающим случайные колебания маятника, являются тепловые флуктуации. Если нас интересует наименьшая величина силы F, которая может раскачать такой маятник так, чтобы оператор

мог зарегистрировать эту силу на фоне тепловых (броуновских) флуктуаций маятника, то необходимо, чтобы выполнялось условие

$$F \gtrsim \sqrt{\frac{8kT_{м}m}{\hat{\tau}\tau_{м}^{*}}} ,$$

где k — постоянная Больцмана, $T_{м}$ — температура маятника, m — его масса, $\tau_{м}^{*}$ — время релаксации маятника (время затухания колебаний), $\hat{\tau}$ — время усреднения.

Рассматривая гравитационные опыты, более удобно использовать не величину силы F, а величину ускорения F/m. Тогда условие, приведенное выше, будет иметь следующий вид:

$$\frac{F}{m} \gtrsim \sqrt{\frac{8kT_{м}}{m\hat{\tau}\tau_{м}^{*}}} .$$

Как видно из этого простого условия, экспериментатор может выиграть в чувствительности за счет понижения температуры $T_{м}$, увеличения времени усреднения $\hat{\tau}$ и, самое существенное, за счет увеличения времени релаксации $\tau_{м}^{*}$. Для оценок можно подставить $T_{м} \simeq 0{,}1$ К, если $m \simeq 10^{1}$—10^{2} г. В следующем разделе будут приведены описания программ, в которых предполагается создать установку с $T_{м} \simeq 3 \cdot 10^{-3}$ К и $m \simeq 5 \cdot 10^{6}$ г. Величина времени усреднения не может быть выбрана слишком большой, если экспериментатор хочет оставить в резерве возможность провести несколько контрольных измерений. Если полная продолжительность эксперимента составляет 4—5 месяцев, то разумная оценка для $\hat{\tau} \simeq 10^{6}$ с (около 12 дней). Для того чтобы оценить доступное значение $\tau_{м}^{*}$ предположим, что удалось подвесить коромысло крутильного маятника на сверхпроводящем подвесе. Тогда для достаточно долгопериодной механической колебательной системы единственным источником трения будет остаточный газ вокруг коромысла. В этом случае выражение для $\tau_{м}^{*}$ будет иметь следующий вид:

$$\tau_{м}^{*} \simeq \frac{m}{4S(\mu kT_{м})^{1/2}n_{0}} ,$$

где S — площадь масс и коромысла, μ — масса молекулы остаточного газа, n_0 — число молекул газа в единице объема. Если в этом выражении положить $T_м=0{,}1$ К, $m=10$ г, $n_0=10^7$ см$^{-3}$, $\mu=6\cdot10^{-24}$ г (остаточный газ — гелий), $S=3$ см^2, то величина $\tau^*_м$ должна быть равна 10^{13} с. Подставляя такую величину $\tau^*_м$ в выражение для F/m и полагая $\tau=10^6$ с, получим следующую оценку для наименьшего обнаружимого в лабораторных условиях ускорения:

$$\frac{F}{m} \simeq 1\cdot10^{-18} \text{ см/с}^2$$

Здесь уместно подчеркнуть, что эта величина на пять порядков меньше, чем ускорение, которое можно было разрешить в опыте по проверке принципа эквивалентности (он описан в первом разделе). Однако в этом опыте, выполненном шесть лет назад, измерения производились при комнатной температуре, и в нем не было применено никаких устройств для вычитания сейсмических возмущений.

Если в условиях опыта ускорение изменяется по синусоидальному закону и есть возможность подстроить период изменения ускорения так, чтобы он был равен периоду собственных колебаний крутильного маятника, то при амплитуде ускорения, равной $1\cdot10^{-18}$ см/с^2, амплитуда колебаний конца коромысла будет довольно большой. Несложные вычисления показывают, что при периоде собственных колебаний коромысла $\tau_0 \simeq 10^4$ с и при полной длительности такого периодического ускорения $\hat{\tau}=10^6$ с размах колебаний концов коромысла маятника составит $4\cdot10^{-10}$ см. Такую величину относительно легко зарегистрировать, например, с помощью оптического интерферометра.

Мы здесь не останавливаемся на влиянии индикатора малых смещений, который также вносит свой вклад в флуктуационное движение маятника. Можно показать, что при больших величинах $\hat{\tau}$ этот вклад незначителен.

Перейдем теперь к сравнению полученного численного значения для F/m с возможной величиной ускорения, вызываемого чисто релятивистским гравитационным эффектом. Представим себе, что основная часть одной из двух масс на концах коромысла крутильного

маятника представляет собой шар, который свободно подвешен внутри оболочки и раскручен до частоты Ω_1. Если приблизить к этому коромыслу другой шар, раскрученный до частоты Ω_2, то, кроме чисто ньютоновского притяжения, возникает добавочное, которое в единицах ускорения можно следующим образом связать с плотностью материалов шаров ρ и их радиусами R_1 и R_2:

$$\left(\frac{F}{m}\right)_{\text{вращ}} \simeq \frac{4G\rho R_1}{c^2} (\Omega_1 R_1)(\Omega_2 R_2).$$

Это выражение, вытекающее из ОТО, справедливо, если расстояние между шарами порядка R_2 и $R_1 \ll R_2$.

Если подставить $\Omega_1 R_1 = \Omega_2 R_2 = 5 \cdot 10^4$ см/с, $R_1 = 2$ см, $\rho = 8$ г/см^3, то получим $(F/m)_{\text{вращ}} \simeq 1 \cdot 10^{-17}$ см/с^2, что на порядок больше, чем полученная выше оценка.

Приведенное выражение дает наибольшее значение для $(F/m)_{\text{вращ}}$. Знак и направление ускорения зависят от взаимного расположения осей вращения двух шаров. Если менять направление вращения второго шара на противоположное, то добавочное к ньютоновскому притяжение сменится на отталкивание. Таким путем можно, как говорят экспериментаторы, кодировать эффект— в данном случае отличить его от чисто ньютоновского притяжения, которое в $c^2(\Omega_1 R_1)^{-1}(\Omega_2 R_2)^{-1}$ раз больше.

Приведенный расчет показывает, что в лабораторных условиях можно в принципе измерить «спин-спиновое» гравитационное взаимодействие, которое внешне очень напоминает взаимодействие двух катушек с электрическими токами.

Обратимся теперь к двум другим релятивистским гравитационным эффектам, которые не имеют аналогов в электродинамике. Уравнения ОТО являются нелинейными. Для обычных лабораторных масс это очень малая нелинейность, тем не менее в ней заключается одно из качественных отличий эйнштейновской гравитационной теории от теории Максвелла для электромагнитного взаимодействия. Качественно понять появление нелинейности можно на следующем примере. Представим себе, что нас интересует взаимное притяжение двух тел. Масса их сосредоточена не только в них самих, но и в гравитационном поле, ими порожденном. При приближении этих двух тел их гравитационные поля складываются, а с ними изменяется рас-

пределение дополнительной массы, связанной с суммарным гравитационным полем. Таким образом, для двух точечных масс притяжение не должно точно подчиняться закону Ньютона. Если же между двумя телами поместить третье, то из-за того же эффекта возникает добавочная сила, которая формально будет носить характер «экранировки»: добавочное притяжение к этому третьему телу будет немного меньше, чем если бы не было второго тела. Для того чтобы перейти к оценкам, представим себе, что первое тело m_1 — на одном из концов коромысла весов, второе — Земля, а третье — m_2 вносится между m_1 и поверхностью Земли. В этом случае, кроме притяжения m_1 к Земле и m_1 к m_2, появится добавочная сила, сообщающая m_1 ускорение $(\Delta F/m_1)_{\text{нелин}}$, которая может быть оценена с помощью простой формулы:

$$\left(\frac{\Delta F}{m_1}\right)_{\text{нелин}} \simeq \frac{G m_2 g}{2c^2 r_{1,2}},$$

где g — ускорение свободного падения на Землю, $r_{1,2}$ — расстояние между m_1 и m_2. Полагая в этом выражении $m_2=10^5$ г, $r_{1,2}=30$ см, получим $(\Delta F/m_1)\simeq 2\cdot 10^{-22}$ см/с^2. Эта оценка почти на четыре порядка меньше оптимистической оценки $(F/m)=1\cdot 10^{-18}$ см/с^2, которая была получена выше. Поэтому, если гравитационное взаимодействие вращающихся тел можно попытаться измерить в лабораторных условиях, то измерение нелинейных гравитационных эффектов в лаборатории представляется безнадежным.

Второй релятивистский гравитационный эффект, который можно попытаться измерить в земных лабораторных условиях, и который не имеет аналога в электродинамике, напоминает немного схему опыта, предложенного для спутников на полярных орбитах Эверитом и Ван Паттеном (см. выше). Представим себе, что в нашем распоряжении имеется массивный вращающийся шар, ось вращения которого направлена вертикально, а вокруг шара в горизонтальной плотности размещен тороидальной формы электромагнитный резонатор. Если в таком резонаторе возбудить стоячую электромагнитную волну, то за счет чисто гравитационного взаимодействия этой волны с вращающимся шаром возникает слабый эффект «увлечения» электромагнитной волны. Тороидальный резонатор должен быть располо-

жен в экваториальной плоскости шара. Если масса последнего 5 и он имеет радиус 50 см, то, придав ему вращение со скоростью на экваторе около 10^5 см/с, экспериментатор может заметить сдвиг в стоячей воде в 10^{-15} радиан через сутки. При этом время релаксации электромагнитных колебаний также должно быть около суток.

Фазовый сдвиг в 10^{-15} радиан измерить весьма трудно. Мы не приводим здесь подробного анализа условий, выполнение которых необходимо для достижения такого разрешения. Подчеркнем только, что эта величина на несколько порядков меньше, чем измеряемые в настоящее время разности фаз электромагнитных колебаний. Однако оценки показывают, что она не является безнадежно малой, как в случае с нелинейным добавком к ньютоновскому ускорению, и что можно надеяться, что в ближайшие несколько лет радиофизики разработают соответствующие методы, которые позволят измерять такие малые сдвиги фаз. Весьма существенным обстоятельством для такого эксперимента является то, что эффект хорошо кодируется: изменение направления оси вращения шара изменяет направление, в котором «увлекается» стоячая электромагнитная волна.

Из приведенных выше примеров видно, что, возможно, через несколько лет экспериментаторы приступят к разработке программ наземных релятивистских гравитационных экспериментов. Два из рассмотренных трех экспериментов являются достаточно перспективными. Не исключено, что и другие, возможно, более простые схемы опытов будут предложены и реализованы.

В заключение этого параграфа остановимся еще на одном возможном релятивистском гравитационном опыте, который можно выполнить в наземной лаборатории. Речь идет об измерении изменения веса нагретого тела. Вложение тепловой энергии $\varepsilon_т$ при нагревании на ΔT должно привести к изменению полной массы тела на величину $\Delta m = \varepsilon_т c^{-2}$. Если тело, подвешенное на коромысле весов, имеет массу m и теплоемкость C_0, то относительное изменение его веса ΔP составляет

$$\frac{\Delta P}{P} \simeq \frac{\Delta m}{m} = \frac{\varepsilon_т}{c^2} = \frac{C_0 \Delta T}{c^2} .$$

При обычной для твердых тел теплоемкости $C_0 \simeq$

$\simeq 10^7$ эрг/г·град и изменении температуры $\Delta T = 100°$ С величина $\Delta P/P \simeq 1 \cdot 10^{-12}$. Такое изменение веса относительно велико. Если, например, период колебаний коромысла весов составляет 40 с, то вертикальное смещение коромысла составит $2 \cdot 10^{-8}$ см, что не слишком сложно измерить обычными оптическими или радиотехническими датчиками. Следует отметить, что такой эксперимент можно также назвать проверкой принципа эквивалентности для фононов.

Поиски гравитационных волн внеземного происхождения

Проблема обнаружения гравитационных волн[1] является одной из наиболее сложных гравитационных экспериментальных проблем. Количество публикаций, посвященных источникам и приемникам гравитационного излучения, приближается к тысяче. И хотя к настоящему времени есть ясность по поводу того, как нужно делать приемники и на какие излучения следует рассчитывать, можно сказать, что только оптимистически настроенные экспериментаторы считают, что проблема будет решена примерно через 5—10 лет.

Остановимся коротко на основных свойствах гравитационного излучения. Одно из решений уравнений ОТО представляет собой волну, описывающую изменение свойств пространства — времени. Эта волна распространяется со скоростью, равной скорости света. Можно, несколько упрощая, сказать, что это — оторвавшиеся (или, по выражению Лоренца, «отпочковавшиеся») от источника волны переменного ускорения.

Так же, как и электромагнитные, гравитационные волны — поперечные, т. е. сообщаемое всем телам одинаковое ускорение (в соответствии с принципом эквивалентности) имеет направление, перпендикулярное распространению волны. Так же, как в электромагнитной, в гравитационной волне амплитуда убывает обратно пропорционально расстоянию от источника. В соот-

[1] Более подробно о гравитационных волнах можно узнать из брошюры: А. Ф. Писарев. Гравитационные волны. М., «Знание», 1975.

ветствии с принципом эквивалентности в малой области, через которую проходит гравитационная волна, ускорение, сообщаемое телам, одно и то же. Однако если расположить несколько тел в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны, на конечном расстоянии одно от другого, то различия в ускорениях разных тел будут тем больше, чем больше расстояние между ними. Это правило справедливо до тех пор, пока расстояние не превысит половину длины волны (время движения электромагнитного сигнала от тела до тела не будет больше, чем половина периода). Именно эта разность ускорений вызывает механические смещения и изменения скорости движения, которые в принципе можно обнаружить.

Основные проблемы, стоящие перед экспериментаторами, разрабатывающими гравитационные детекторы, состоят в том, чтобы, во-первых, сделать достаточно чувствительную аппаратуру, измеряющую малые смещения (или скорости), во-вторых, поставить пробные тела, на которые воздействует гравитационная волна, в такие условия, чтобы смещения, вызванные волной, были существенно больше смещений, вызванных другими причинами.

Ниже мы последовательно рассмотрим состояние исследований по поиску гравитационных волн сравнительно высоких частот, затем — сравнительно низких и в заключение коснемся проблемы реализации в земной лаборатории гравитационного опыта Герца.

1. ПОИСКИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

Мощность излучения гравитационных волн $\varepsilon_{гр}$ от колеблющейся или вращающейся системы масс (которая должна обладать переменным во времени квадрупольным моментом массы) можно записать в следующем виде:

$$\varepsilon_{гр} \simeq \frac{G}{c^5} m^2 R^4 \omega^6,$$

где m — порядок массы колеблющегося (или вращающегося) тела, размеры которого R, а частота колебаний — ω. Из этого соотношения ясно, что множитель $G/c^5 \simeq$

$\simeq 2 \cdot 10^{-60}$ CGSE ед. является основным препятствием для создания достаточно мощного лабораторного источника гравитационного излучения. Вместе с тем $\varepsilon_{гр}$ пропорционально m^2, поэтому следует ожидать, что при достаточно больших m, R и ω отношение

$$\frac{\int_{t_1}^{t_2} \varepsilon_{гр} dt}{mc^2}$$

может быть близко к единице. Иными словами, достаточно массивные тела при вращении вокруг общего центра масс или при столкновениях должны излучать полную энергию в виде гравитационного излучения, по величине близкую к mc^2. Точные расчеты, выполненные советским ученым Новиковым, а также американцами Торном и Острайкером, показали, что такие явления действительно должны иметь место при нескольких видах катастроф в нашей Галактике. При этом КПД преобразования массы в гравитационное излучение может достигать десятков процентов. К таким катастрофам относятся:

а) несимметричный гравитационный коллапс [2],

б) столкновение сколлапсировавших звезд (черных дыр),

в) столкновение нейтронных звезд (пульсаров),

г) взрыв сверхновой звезды.

При таких процессах можно ожидать короткого всплеска гравитационного излучения с длительностью $\tau_{гр} \simeq 10^{-3}$—10^{-4} с и полной энергией 10^{52}—10^{55} эрг. Поэтому детекторы гравитационной волны должны быть рассчитаны на прием относительно высокочастотных (1—10 кГц) волн, имеющих форму коротких всплесков. Основной вопрос состоит в том, как часто происходят перечисленные выше катастрофы. Взрывы сверхновых могут происходить один раз в 30—100 лет в одной га-

[2] Гравитационным коллапсом называется сжатие под действием собственного гравитационного поля звезды, у которой «выгорела» значительная часть ядерного горючего. При таком сжатии гравитационный потенциал $\Delta\varphi$ на поверхности звезды стремится к c^2, и все процессы на поверхности, с точки зрения внешнего наблюдателя, замедляются (при $\Delta\varphi = c^2$ должна произойти полная их остановка). Сколлапсировавшая звезда иногда называется также черной дырой, так как фотоны не могут покинуть ее поверхность из-за того, что гравитационный потенциал весьма близок к c^2.

лактике. В скоплении галактик в созвездии Девы («virgo» cluster), которое находится от нас на расстоянии около 15 мегапарсек (т. е. $5 \cdot 10^{25}$ см), в течение года наблюдается 3—4 взрыва сверхновых звезд. Таким образом, экспериментаторы, надеющиеся обнаружить высокочастотные гравитационные волны, должны наблюдать одновременно много галактик, с тем чтобы число всплесков, достигающих Земли, отмеченное ими, составило несколько единиц в год.

Например, в сфере с радиусом 3 мегапарсека от нас — примерно 300 галактик. Если в одной из них произошел коллапс звезды массой в 30 солнечных, и это случилось на краю такой сферы, то при КПД преобразвания 10% до земной лаборатории дойдет относительно большой поток энергии гравитационного излучения. Его плотность составит примерно 10^4 эрг/см^2. Это оптимистическая оценка. Если в каждой из 300 галактик такие явления происходят один раз в 30—100 лет, то на Земле можно ожидать прихода соответственно 10—3 всплесков в год.

Более реалистичной, по-видимому, является оценка плотности энергии, достигающей Земли, в 1 эрг/см^2 (выделение 10^{52} эрг при катастрофе на расстоянии в 15 мегапарсек; в сфере с таким радиусом около 10^4 галактик). В дальнейших расчетах мы будем опираться на эти две оценки плотности энергии: оптимистическую — 10^4 эрг/см^2 и реалистическую — 1 эрг/см^2.

В нескольких лабораториях мира в настоящее время проводятся интенсивные исследования с целью создания гравитационных антенн, которые могли бы регистрировать описанные выше всплески гравитационного излучения. По-видимому, многие читатели знают, что первым экспериментатором, предпринявшим попытку обнаружить такие волны, был профессор Мэрилендского университета (США) Вебер. Пороговая чувствительность его антенн была около 10^6 эрг/см^2. Однако полученные Вебером предварительные положительные результаты не были подтверждены на девяти антеннах аналогичного устройства, которые были изготовлены и запущены в СССР, США, ФРГ, Франции, Англии и Италии. С этого момента и началась подготовка к созданию антенн второго поколения, чувствительность которых должна достигнуть по крайней мере оптимистической оценки — 10^4 эрг/см^2.

Рассмотрим более подробно условия, необходимые для того, чтобы два типа таких антенн обладали чувствительностью в 10^4 эрг/см^2 и 1 эрг/см^2.

Гравитационно-волновой импульс с плотностью энергии I, длительностью $\tau_{гр}$ и средней частотой $\omega_{гр} \simeq 1/\tau_{гр}$ создает разность ускорений $(F/m)_{гр}$ на расстоянии l, равную

$$\left(\frac{F}{m}\right)_{гр} \simeq \omega_{гр} l \sqrt{\frac{8\pi G}{c^3} \frac{I}{\tau_{гр}}}$$

Если положить $l = 10^2$ см, $\tau_{гр} \simeq 2 \cdot 10^{-4}$ с, то для $I_1 = 10^4$ эрг/см^2 величина $(F/m)_{гр.1} \simeq 5 \cdot 10^{-9}$ см/с^2, а для $I_2 = 1$ эрг/см^2 величина $(F/m)_{гр.2} \simeq 5 \cdot 10^{-11}$ см/с^2. Предположим, что в качестве основной части антенны использован длинный массивный цилиндр, низшая собственная частота механических колебаний которого $\omega_м$ примерно равна $\omega_{гр}$, а длина примерно равна l (рис. 8). Тогда амплитуда механических колебаний, вызванных такими импульсами, будет для $(F/m)_{гр} \simeq 5 \cdot 10^{-9}$ см/с^2,

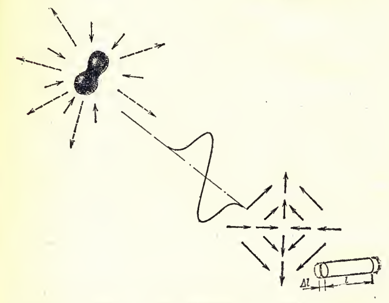


Рис. 8. Пространственное распределение ускорений, вызываемых гравитационной волной

равна величине $\Delta x_1 \simeq 1{,}7 \cdot 10^{-17}$ см, а для $(F/m)_{гр} \simeq 5 \cdot 10^{-11}$ см/с^2 — соответственно, $\Delta x_2 = 1{,}7 \cdot 10^{-19}$ см. Эти две оценки показывают, насколько сложна экспериментальная задача.

Здесь уместно почеркнуть, что величины 10^{-17} см и 10^{-19} см для амплитуд механических колебаний являются физически реальными, так как речь идет о коллективном движении большого числа атомов (во много раз превышающем число Авогадро), и нас интересует относительное смещение центра масс одной такой системы атомов относительно другой. Кроме того, экспериментатору нужно не точное значение положения центра масс, а лишь Фурье-компонента вблизи частоты $\omega_м \simeq \omega_{гр}$ с полосой порядка $\omega_м$ или меньшей (иными словами, из всех возможных частотных компонент, из которых складывается $x(\tau)$ нас интересуют лишь колебания в относительно узкой полосе частот).

Можно сформулировать четыре основных условия, выполнение которых необходимо для достижения высокой чувствительности такой твердотельной гравитационной антенны.

1) **Ослабление броуновских флуктуаций.** Тепловые флуктуации на низкочастотной составляющей колебаний цилиндра является первой существенной помехой при обнаружении малых колебаний, вызванных гравитационно-волновым импульсом. Нетрудно получить следующее выражение для Фурье-компоненты (в полосе частот $1/\tau_{гр}$) ускорения $(F/m)_{бр}$, вызываемого тепловыми флуктуациями:

$$\left(\frac{F}{m}\right) \simeq \sqrt{\frac{4kT_м\omega_м}{mQ_м\tau_{гр}}}\,.$$

В этом выражении k — постоянная Больцмана, $T_м$ — температура механического термостата, m — масса, примерно равная одной трети полной массы цилиндра, $Q_м$ — добротность низшей квадрупольной моды колебаний. Очевидно, что по условиям опыта величины $\omega_м \simeq \simeq \omega_{гр}$ и $\tau_{гр} \simeq 1/\omega_{гр}$ — заданы. Таким образом, в распоряжении экспериментатора имеется лишь параметр $T_м/mQ_м$. Легко понять зависимость $(F/m)_{бр}$ именно от этого параметра. Увеличивая массу системы m и уменьшая ее температуру $T_м$, мы понижаем средний квадрат амплитуды броуновских колебаний и соответственно по-

нижаем интересующую нас Фурье-компоненту флуктуационного ускорения. Увеличение $Q_м$ приводит к «растягиванию» во времени флуктуаций, так как изменение амплитуды броуновских колебаний на величину порядка среднеквадратичной амплитуды происходит за время $\tau_м^* = 2Q_м/\omega_м$. Таким образом, чем меньше отношение $\tau_{гр}/\tau_м^*$, тем меньше флуктуационное изменение амплитуды колебаний и соответственно меньше $(F/m)_{бр}$.

Для того, чтобы отклик гравитационной антенны (изменение амплитуды колебаний под воздействием градиента ускорений, вызванного волной) был различим на фоне броуновского движения, необходимо, чтобы $(F/m)_{бр} \lesssim (F/m)_{гр}$.

В периодической печати опубликованы две сходные программы по разработке твердотельных антенн второго поколения. В первой предполагается заморозить массивный алюминиевый цилиндр полной массой около $5 \cdot 10^6$ г до температуры $T_м = 3 \cdot 10^{-3}$ К. При этом добротность $Q_м$ должна быть порядка 10^7. Подставляя эти величины в выражение для $(F/m)_{бр}$, получим $(F/m)_{бр} \simeq$ $\simeq 4 \cdot 10^{-12}$ см/с^2. Это значение меньше, чем приведенное выше для реалистической оценки потока гравитационного излучения $(F/m)_{гр.2}$.

По величинам $T_м$, m и $Q_м$ можно судить, насколько сложно решение задачи. Для того, чтобы достигнуть таких значений параметров, предполагается пятитонную алюминиевую болванку покрыть слоем сплава ниобий—титан (сверхпроводник с высокой критической температурой) и подвесить ее внутри криостата в магнитном поле. Криостат длиной 5 м, диаметром ~ 2 м имеет пять оболочек: первая — вакуумный кожух, вторая — охлажденная до температуры жидкого азота (77 К), третья — охлажденная парами жидкого гелия (30—40 К), четвертая — охлажденная собственно жидким гелием при пониженном давлении (2 К), пятая — охлажденная до температуры $5 \cdot 10^{-2}$ К за счет взаимного растворения изотопов He^3 и He^4. Охлаждение от $5 \cdot 10^{-2}$ до $3 \cdot 10^{-3}$ К должно происходить за счет адиабатического размагничивания двадцатикилограммового блока парамагнитных солей, термически соприкасающихся с алюминиевым цилиндром.

В реализации этой программы участвуют три лаборатории: две в США (Стэнфордский университет и уни-

верситет штата Луизиана) и одна в Италии (институт физики им. Маркони).

Во второй программе малая величина параметра $T_м/mQ_м$ должна быть достигнута не за счет сверхнизкой температуры $T_м$ и большого значения m, а за счет резкого увеличения $Q_м$.

Остановимся коротко на вопросе о достижимых в принципе величинах механических добротностей $Q_м$. Из теории упругости можно получить следующее упрощенное выражение для произведения $\omega_м Q_м$, которое учитывает только потери в объеме материала:

$$\omega_м Q_м = \frac{4\rho C_p^2}{\hat{\varkappa} T_м \alpha^2},$$

где C_p — удельная теплоемкость, ρ — плотность, α — коэффициент теплового расширения, $\hat{\varkappa}$ — коэффициент теплопроводности материала, из которого изготовлен резонатор. С понижением температуры отношение C_p^2/α^2 становится постоянным (это так называемая константа Грюнайзена). Величина $\hat{\varkappa}$ пропорциональна $T_м^3$ (закон Казимира).

Понижение температуры $T_м$ и выбор материала антенны с малой начальной величиной коэффициента теплопроводности $\varkappa$ позволяет в принципе достигнуть очень высоких уровней $Q_м\omega_м$. Наиболее подходящие материалы для изготовления резонаторов — твердые диэлектрики: кварц, гранат, сапфир, алмаз. Лучшим в этом ряду является алмаз. Однако искусственные кристаллы алмаза невелики, в то время как современные способы выращивания монокристаллов сапфира позволяют достигать массы порядка нескольких десятков килограммов.

Если вернуться к выражению для $Q_м\omega_м$ и подставить в него известные из других измерений значения величин ρ, C_p^2/α^2 и $\hat{\varkappa}$ для $T_м = 2$ К и 0,1 К, то мы получим следующие оценки: $(\omega_м Q_м)_{2К} \simeq 2\cdot 10^{18}$ с$^{-1}$ и $(\omega_м Q_м)_{0,1К} \simeq 10^{21}$ с$^{-1}$. Эти две оценки означают, что при $\omega_м \simeq 3\cdot 10^4$ рад/с в принципе достижимы фантастические величины добротности: $(Q_м)_{2К} \simeq 6\cdot 10^{13}$ и $(Q_м)_{0,1К} \simeq 3\cdot 10^{16}$. Более детальный анализ показывает, однако, что, кроме объемных потерь, значительно более важную роль играют потери технического типа — в поверхност-

ном слое и в подвесе. Действительно, наличие микротрещин и различных неоднородностей покрытий приводит к добавочному затуханию. Ту же роль играет и подвес, через который может рассеиваться энергия механических колебаний.

Тщательная полировка и очистка поверхности и изготовление специальных «антирезонансных» подвесов в настоящее время позволили советским ученым Багдасарову, Митрофанову и Шияну получить на модели резонатора гравитационной антенны — цилиндра из монокристалла сапфира ($m=10^3$ г, $\omega_{м}=2\cdot 10^5$ рад/с) величину добротности $Q_{м}\simeq 5\cdot 10^9$ при температуре 4,3 К.

Если подставить в выражение для $(F/m)_{бр}$ эту величину $Q_{м}$, а также $m=3\cdot 10^4$ г, $T_{м}=0{,}1$ К и $\omega_{м}=3\cdot 10^4$ рад/с, то получим следующую оценку: $(F/m)_{бр}\simeq 1{,}7\cdot 10^{-11}$ см/с^2. Эта оценка меньше, чем реалистическая оценка $(F/m)_{гр.2}\simeq 5\cdot 10^{-11}$ см/с^2.

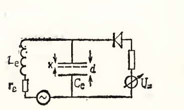
Здесь коротко изложены «механические» особенности программы, которая была начата в нескольких лабораториях в Советском Союзе и к которой присоединилась лаборатория Рочестерского университета (США).

Как видно из сравнения этих двух программ с точки зрения подавления ускорения $(F/m)_{бр}$, использование диэлектрической антенны — более легкой, но с большей величиной $Q_{м}$ — позволяет резко ослабить требования к величине m и температуре. Резюмируя, можно сказать, что в принципе в настоящее время решение задачи подавления броуновских флуктуаций для достижения уровня $I_2=1$ эрг/см^2 представляется достаточно ясным.

2) Требования к датчику малых колебаний. К сожалению, такой ясности нет в отношении устройства, позволяющего регистрировать механические колебания с амплитудой порядка 10^{-17} см и меньших. К настоящему времени есть согласие между экспериментаторами в том, что лучшим устройством для регистрации малых колебаний является устройство типа параметрического преобразователя. В таком преобразователе поток мощности электромагнитного излучения с частотой $\omega_{н}$ модулируется механическими колебаниями частоты $\omega_{м}$ с помощью, например, переменной емкости или индуктивности. Таким образом, в потоке мощности появляются кванты с комбинационными частотами $\omega_{н}+\omega_{м}$, число ко-

торых пропорционально амплитуде механических колебаний.

На рис. 9 изображена принципиальная схема одного из таких преобразователей, в котором в качестве управляющего элемента используется емкость с подвижными пластинами. Предположим, что одна из пластин емко-



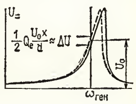


Рис. 9. Принципиальная схема одного из вариантов емкостного датчика

стного датчика присоединена к торцу гравитационной антенны, а вторая неподвижна. Пусть частота генератора $\omega_н$ совпадает с самым крутым участком склона резонансной кривой контура. Для этого необходимо, чтобы выполнялось условие

$$\omega_н=\omega_e\pm\frac{\omega_e}{2Q_e},$$

где ω_e — резонансная частота электрического контура, электрическая добротность которого равна Q_e.

Очевидно, что механическое смещение x сдвигает резонансную частоту ω_e на величину $\Delta\omega_e=\omega_e x/2d$, где d — среднее расстояние между пластинами. В результате изменится и величина средней амплитуды электрических колебаний U примерно на

$$\Delta U\simeq\frac{1}{2}Q_e U\frac{\Delta x}{d}.$$

Если в этом выражении положить $U/d=10^6$ В/см (т. е. несколько меньше критического значения напряжения, при котором начинается автоэлектронная эмиссия) и $Q_e=10^8$ (примерно в 10^3 раз меньше рекордного значения величины электрической добротности микроволновых резонаторов из сверхпроводников), то при $\Delta x=1\cdot10^{-19}$ см величина $\Delta U\simeq{}^1/_2\cdot10^8\cdot10^6\cdot10^{-19}=0{,}5$.

$\cdot 10^{-5}$ В. Казалось бы, такое изменение ΔU нетрудно зарегистрировать, и задача измерения малых механических колебаний может быть относительно легко решена.

Однако это не так. Дело в том, что система регистрации малых механических колебаний является одновременно источником флуктуационного механического воздействия на механический резонатор. В электрическом контуре при конечной температуре T_e и конечной добротности Q_e присутствуют, кроме относительно мощных колебаний на частоте $\omega_н$, еще и флуктуационные электрические колебания, имеющие все частоты, в том числе и частоты $\omega_н \pm \omega_м$. Пластины конденсатора притягиваются с силой, пропорциональной квадрату полного расстояния между ними (закон Кулона). Как следствие такой квадратичной зависимости, между обкладками появляется флуктуационная сила, пропорциональная как $U_\sim$, так и температуре T_e и имеющая Фурье-компоненту вблизи частоты $\omega_м$, т. е. там, где мы ожидаем обнаружить сигнал. Таким образом, с одной стороны, выгодно увеличивать накачку — величину $U_\sim$, тогда мы сможем различать меньшие $U_\sim$ и, следовательно, меньшие $(F/m)_{гр}$, а с другой стороны, выгодно уменьшать $U_\sim$, с тем чтобы $(F/m)_{гр}$ превосходила величину флуктуационного ускорения $(F/m)_{эл}$, вызванного «комбинацией» накачки и электрических импульсов в контуре.

Совместное решение двух уравнений, соответствующих этим двум противоречивым условиям, дает оптимальную величину $[U_\sim]_{оптим}$ и наименьшую величину $(F/m)_{эл}$ ускорения, обнаружимого на фоне электрических шумов:

$$\left(\frac{F}{m}\right)_{эл} \approx \frac{2}{\tau_{гр}}\sqrt{\frac{kT_e\omega_м}{m\omega_e}},$$

где m, так же, как и в выражении для $(F/m)_{бр}$, порядка $^1/_3$ полной массы механического резонатора. Подчеркнем еще раз, что для обнаружения всплеска гравитационного излучения необходимо, чтобы создаваемое им ускорение $(F/m)_{гр}$ было больше, чем $(F/m)_{эл}$. Выражение для $(F/m)_{эл}$ является классическим. Оно справедливо, если $kT_e/\omega_e > \hbar$, а также если $\tau_{гр} \gg Q_e/\omega_e$. Можно повторить аналогичные рассуждения, если вместо электрического контура использован резонатор Фабри—Пе-

ро, а вместо электрического генератора накачки—лазер. Вместо кулоновского притяжения между пластинами роль нелинейности в этом случае будет играть давление электромагнитного излучения (лебедевское давление) между стенками резонатора. Это давление также пропорционально квадрату амплитуды поля. В результате расчета оказывается, что выражения для $(F/m)_{св}$ совпадают с выражением для $(F/m)_{эл}$, если в последнем заменить kT_e/ω_e на постоянную Планка.

Необходимо отметить, что аналитическое выражение для $(F/m)_{эл}$ получено в предположении, что генератор накачки является идеальным, т. е. представляет собой источник чисто синусоидальных колебаний.

Если подставить в выражение для $(F/m)_{эл}$ величины $T_e = 1$ К, $m = 1{,}7 \cdot 10^6$ г, $\omega_e = 3 \cdot 10^{10}$ рад/с, $\omega_м = 3 \cdot 10^4$ рад/с, $\tau_{гр} = 2 \cdot 10^{-4}$ см/с^2, то получим, что $(F/m)_{эл} \simeq 2 \cdot 10^{-10}$ см/с^2. Эта величина меньше, чем $(F/m)_{гр.1}$, но больше, чем $(F/m)_{гр.2}$. Иными словами, достижимой является при этих параметрах лишь оптимистическая оценка чувствительности $I_1 = 10^4$ эрг/см^2.

Меньшие значения T_e нельзя подставить в формулу для $(F/m)_{эл}$ без особых оговорок. Дело в том, что более детальный анализ (который мы здесь не приводим) показывает, что шумовая температура усилителя должна быть не больше T_e. Это третье из четырех основных условий, предъявляемых к твердотельным гравитационным антеннам. Значение $T_e = 1$ К соответствует наинизшей принципиально достижимой температуре квантового усилителя — мазера. Оказывается, что есть потенциальная возможность спуститься еще ниже, если только реализовать идею квантового неразрушающего измерения. Или, если пользоваться языком радиоинженеров — создать усилитель, обладающий шумовой температурой 10^{-2}—10^{-3} К. Такая возможность, в принципе, существует. Однако к настоящему времени опубликовано лишь теоретическое обоснование такого устройства.

Рассмотрим теперь последнее, четвертое условие для твердотельной антенны. До сих пор генератор накачки рассматривался как идеальный. К сожалению, чисто синусоидальный электрический сигнал — принципиально недостижимая мечта. Реальный электрический генератор обладает «шумовыми крыльями». Эти «крылья» представляют собой сплошной шум, резко увеличивающийся к основной генерируемой частоте $\omega_н$. Ясно, что в

этом шуме содержатся и частоты $\omega_н \pm \omega_м$, которые будут «забивать» полезный сигнал, вызванный гравитационным всплеском. Существует несколько методов, позволяющих ослабить влияние этих «крыльев». Наиболее удачным является использование в качестве электрического резонатора, связанного с генератором, полости из сверхпроводящего металла. Такой резонатор, как отмечалось выше, обладает весьма высокой добротностью при гелиевых температурах. Эта идея была впервые высказана советским физиком Хайкиным. Более подробный анализ, выполненный другим советским ученым Минаковой, показал, что удобным вариантом является трехрезонаторный генератор с двумя низкодобротными резонаторами $Q_1 \simeq Q_2$ и третьим, обладающим возможно более высокой добротностью Q_3. Оказалось, что в таком варианте шумовая мощность в «крыльях» при оптимальной связи между резонаторами ослабляется в $(Q_3/Q_2)^2$ раз.

Можно получить аналитическое выражение для допустимого уровня шума в «крыльях», подобные тем, которые были получены для $(F/m)_{бр}$ и $(F/m)_{эл}$. Если подставить в них оптимальную величину мощности накачки, а также доступные значения Q_1 и Q_3, то окажется, что это четвертое условие не является таким суровым, как третье и второе, и реалистическая оценка $I_2 = 1$ эрг/см^2 оказывается вполне достижимой. Однако и здесь следует подчеркнуть, что для выполнения четвертого условия необходимо разрабатывать новую электронную аппаратуру.

Резюмируя изложенные требования для обеспечения работы твердотельных гравитационных антенн, можно сказать, что только соединение многих достижений современной низкотемпературной электроники, физики низких температур, а также физики твердого тела в сочетании с разработкой принципиально новых методов позволит достигнуть разумных чувствительностей антенн и, возможно, позволит обнаружить всплески высокочастотного гравитационного излучения.

Мы здесь не касались таких «технических неприятностей», как воздействие сейсмических, акустических, магнитных помех на антенну, воздействие ливней космического излучения и т. д. Все эти явления, естественно, повышают величины $T_м$ и T_e. Ясно, что хорошая соответствующая изоляция, а также независимый конт-

роль этих помех с последующей антнкорреляционной обработкой позволяют, в принципе, избавнться от ннх. Используя язык теорни обнаружения, можно сказать, что эти помехн полностью детерминированы. Однако очевндно, что для их устранения потребуется немало усилий.

Остановнмся коротко на другом типе гравитацнонных антенн второго поколения, которые разрабатываются в трех лабораториях: в уннверситете г. Глазго (Великобритания), в Массачузетском технологическом ннституте (США) н в институте нм. Планка (ФРГ). В этих антеннах также предполагается обнаружить высокочастотные всплескн гравнтационного излучення от нсточников, которые былн перечислены в начале этого раздела.

В отличне от описанных выше твердотельных антенн, в этнх лабораториях предполагается работать при комнатной температуре н использовать относительно большие массы, подвешенные на тонких нитях. При этом расстояние между массамн должно быть порядка 10 м, что сразу на порядок увеличнвает величину $(F/m)_{гр}$ н, следовательно, ослабляет требование к уровню $(F/m)_{эл}$.

Использованне тонких нитей в качестве подвесов позволяет сннзнть величину $(F/m)_{бр}$ в диапазоне рабочих частот (около 1—10 кГц), т. е. много выше собственной

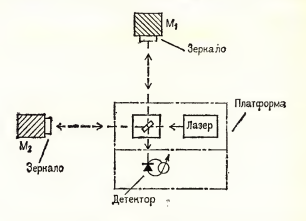


Рис. 10. Схема наземного приемника гравитационного излучения со свободными массами

механической частоты колебаний массы на подвесе. В качестве индикатора малых колебаний в такой антенне предполагается использовать лазерный интерферометр (рис. 10). Можно воспользоваться теми оценками, которые были приведены выше, для того чтобы получить представление о трудностях, которые придется преодолеть.

Для оптимистической оценки $I_1 = 10^4$ эрг/см² на расстоянии $l = 1$ м амплитуда механического колебания, вызванного гравитационной волной, составляет $\Delta x = 1{,}7 \cdot 10^{-17}$ см. Соответственно при $l = 10$ м Δx увеличится до $1{,}7 \cdot 10^{-16}$ см. Вместе с тем лучшие современные лазерные индикаторы малых колебаний позволяют измерять лишь 10^{-13} см. Таким образом, необходим скачок по крайней мере на три порядка. При этом придется пользоваться лазерами, мощность которых превышает несколько ватт, а уровень флуктуаций должен быть несущественно больше уровня, определяемого чисто фотонным шумом (в обычных лазерах он в 10^3—10^4 раз больше).

Вторым существенным недостатком таких антенн является использование низкочастотных подвесов, что сильно затрудняет антисейсмическую изоляцию.

Можно, по-видимому, высказать предположение, что для антенны такого типа чувствительность $I_1 = 10^4$ эрг/см² является достижимой. Однако, возможно, придется еще больше увеличивать размеры установки — величину l.

2. АНТЕННЫ ДЛЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

Для эффективного приема низкочастотных гравитационных волн длина антенны должна быть существенно больше, чем для приема волн высокочастотных. Очевидно, что в этом случае целесообразнее воспользоваться двумя сильно разнесенными пробными телами, например, двумя спутниками или Землей и спутником (рис. 11). Для регистрации малых возмущений траекторий таких пробных тел удобно применять не систему регистрации вариации расстояний, а так называемую доплеровскую систему измерения скорости. Хорошо известно, что относительное изменение частоты

$(\Delta f/f)_D$, вызванное разницей скоростей Δv приемника и передатчика, равна

$$\left(\frac{\Delta f}{f}\right)_D = \frac{\Delta v}{c},$$

где c — скорость распространения света.

Относительное изменение скорости между двумя телами $(\Delta v/c)_{гр}$, вызванное гравитационной волной, может быть выражено через плотность потока энергии I

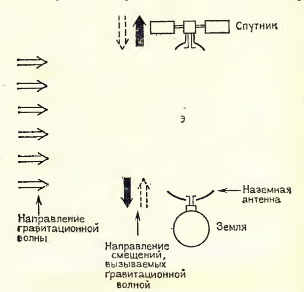


Рис. 11. Схема гравитационной антенны со спутником

и длительность ожидаемого всплеска гравитационного излучения $\tau_{гр}$ следующим образом:

$$\left(\frac{\Delta v}{c}\right)_{гр} \simeq l \sqrt{\frac{8\pi G}{c^5}\,\frac{I}{\tau_{гр}}}\,.$$

Очевидно, что величина $(\Delta v/c)_{гр}$ должна быть не меньше, чем квазистатическая стабильность частоты передатчика $(\Delta f/f)_2$, о которой мы упоминали в разделе, посвященном спутнику, свободному от сноса. Напомним, что наивысшая достигнутая сейчас квазистатическая стабильность в сантиметровом диапазоне длин

волн соответствует $(\Delta f/f)_2 = 3\cdot10^{-16}$ за 10^3 с. Этой величины удалось добиться за счет стабилизации СВЧ-генератора с помощью сверхпроводящего резонатора, который был помещен в жидкий гелий и, в свою очередь, тщательно термостатировался.

Чтобы оценить возможности современного эксперимента с воздействием гравитационной волны на пару пробных тел (например, Земля—спутник), удобнее предсказанную величину относительного изменения скорости $(\Delta v/c)_{гр}$ сравнивать с приведенной выше стабильностью $(\Delta f/f)_2 = 3\cdot10^{-16}$, а не пользоваться величиной l, как это сделано раньше.

Ниже, при перечислении различных источников гравитационных волн, указаны максимальные значения $(\Delta v/c)_{гр}$, которым соответствует $l \simeq c\tau_{гр}/2$.

а) Несимметричный коллапс ядер галактик.

Американскому ученому Торну принадлежит гипотеза о возможном несимметричном коллапсе ядер галактик. Такие события происходят с одной галактикой редко (возможно, один раз в миллиард лет), но так как в нашей Метагалактике полное количество галактик может достигать 10^{10}, то полное количество всплесков может оказаться достаточно большим. При таком коллапсе высвобождается огромное количество энергии в виде низкочастотных гравитационных волн, так что на расстояниях порядка радиуса Метагалактики ($3\cdot10^{27}$ см) возмущения, вызываемые ими, довольно значительны.

По оценкам Торна, при несимметричном коллапсе ядра с массой в $5\cdot10^8$ солнечных масс вблизи границы Метагалактики импульс гравитационного излучения (его длительность около 10 ч) вызовет максимальное изменение скорости $(\Delta v/c)_{гр} = 1\cdot10^{-14}$. Если произошел коллапс малого ядра, в $5\cdot10^5$ солнечных масс на таком же расстоянии, то импульс короче — около 40 с, а величина $(\Delta v/c)_{гр} = 1\cdot10^{-17}$.

К сожалению, неполнота наших представлений о строении и эволюции галактик не дает возможности точно сказать, как часто происходят такие катастрофы. Поэтому разброс между оценками очень велик. Оптимистической оценке соответствует один импульс в неделю, пессимистической — один импульс в 300 лет.

б) Излучение скопления звезд. Советским ученым академику Зельдовичу и Полнареву принадлежит идея о существовании в центре нашей Галактики скопления

(кластера) сверхплотных звезд. При близком пролете двух звезд внутри такого скопления они излучают всплески гравитационного излучения. Эти всплески тем короче и мощнее, чем меньше прицельное расстояние. Для разумной модели такого скопления можно ожидать всплесков длительностью $\tau_{гр}\simeq 10^2$ с, которые вызывают наибольшее относительное изменение $(\Delta v/c)_{гр}\simeq 1\cdot 10^{-18}$. Таких импульсов можно ожидать довольно много — один-два в неделю.

в) Гравитационно-волновой шум. Советский ученый Грищук рассмотрел возможность существования реликтового гравитационного излучения (аналогичного уже давно известному реликтовому электромагнитному излучению). Согласно его вычислениям, в течение 10^3 с можно ожидать наибольших изменений скорости между Землей и спутником, вызванных таким излучением, $(\Delta v/c)_{гр}\simeq 1\cdot 10^{-17}$ (оптимистическая оценка).

Резюмируя изложенное, можно сказать, что современный уровень стабилизации частоты позволяет в принципе обнаружить с помощью спутниковой системы с доплеровским измерителем источник *а*, если, конечно, он существует. Нужно при этом заметить, что спутник должен быть заведомо свободным от сноса и с высоким уровнем компенсации негравитационных ускорений. Кроме того, доплеровская система связи Земля—спутник (или спутник—спутник) должна быть многочастотной, чтобы исключить влияние межпланетной плазмы.

Остановимся коротко на вопросе: возможно ли повышение стабильности частоты генераторов электромагнитных волн? Рассмотрим только один эффект: влияние нестабильности температуры T на сдвиг частоты электромагнитного резонатора. Очевидно, что изменение собственной частоты электромагнитного резонатора зависит от коэффициента его теплового расширения $\alpha_т$:

$$\left(\frac{\Delta f}{f}\right)_т=\alpha_т\Delta T.$$

Вместе с тем величина $\alpha_т$ при низких температурах убывает, как T^3, и этот эффект тем заметнее при понижении температуры, чем выше дебаевская температура материала, из которого изготовлен резонатор. Если, например, изготовить полость в монокристалле сапфира, покрыв его изнутри тонким слоем проводника, то при охлаждении такого резонатора до 2 К коэффициент

$\alpha_т$ достигнет величины $5 \cdot 10^{-12}$ град$^{-1}$. Если $\Delta T = 1 \cdot 10^{-6}$ К (что уже удается получить даже для сравнительно массивных тел), то $(\Delta f/f)_т = 5 \cdot 10^{-18}$. Эта оценка показывает, что использование подходящих материалов для изготовления резонаторов, охлаждение их до температур жидкого гелия и ниже и тщательная термостабилизация позволяют в принципе достигнуть квазистатической стабильности значительно более высокой, чем $(\Delta f/f)_2 = 3 \cdot 10^{-16}$ за 10^3 с.

Другие факторы дестабилизации, на которых мы не останавливаемся, также могут быть существенно ослаблены подбором материалов, термостабилизацией, стабилизацией источников питания и т. п. Можно надеяться, что в течение ближайших 10 лет будут достигнуты уровни для $(\Delta f/f)_2 \simeq 10^{-17}$—$10^{-18}$. И тогда, возможно, начнутся поиски гравитационных волн низких частот. В настоящее время в периодической печати не сообщалось о реально разрабатываемых программах.

Рассмотрим теперь еще одну проблему, которая относится одновременно к поискам высоко- и низкочастотных гравитационных волн. Предположим, что несколько наземных лабораторий зафиксировали совпадающие всплески, которые существенно выше броуновских и других флуктуаций, или две независимые спутниковые системы указали на значимую вариацию скорости. Можно ли считать в таком случае гравитационные волны открытыми?

Скептически настроенный оппонент, по-видимому, потребует (не формулируя конкретно) дополнительных доказательств. Положение может сложиться примерно такое же, как и с черными дырами. Большинство «доброжелательно» настроенных оппонентов, опираясь на интуитивные соображения, говорит: «Да, черные дыры в двойных системах открыты, но достоверность этого открытия равна 0,9 (или 0,8, или 0,95 и т. д.)». Менее «доброжелательные» оппоненты придумывают модели систем без черных дыр, удовлетворительно согласующиеся с наблюдательными данными.

Экспериментаторы, работающие с антеннами, предназначенными для обнаружения гравитационных волн внезапного происхождения, могут в случае успеха (совпадения всплесков) предоставить довольно длинный список доказательств. Из этого списка мы выделим лишь главные.

1) Совпадения результатов на нескольких значительно удаленных антеннах.

2) Отсутствие корреляции с сейсмической активностью, с возмущениями электромагнитного поля Земли (собственными и наведенными за счет солнечных возмущений).

3) Сдвиг во времени между наблюдаемыми в антеннах импульсами (если наземные антенны расположены на удаленных точках земной поверхности или если расстояние между спутниками превышает $c\tau_{гр}$).

4) Структура градиентов ускорений, вызванных гравитационной волной, также может быть обнаружена, если временнóе разрешение много больше, чем длительность $\tau_{гр}$, и если в распоряжении экспериментатора есть по крайней мере две взаимно перпендикулярно ориентированные антенны.

5) Обнаружение корреляции между зарегистрированными всплесками и вспышками электромагнитного излучения (например, взрывами сверхновых или импульсами рентгеновского излучения).

Если по всем перечисленным пунктам удастся получить положительные результаты, уровень надежности при обнаружении гравитационных волн существенно повысится. Однако следует подчеркнуть, что в настоящее время еще нет полностью развитой теории надежности при выборе конкурирующих моделей в астрофизике. По-видимому, для создания и развития такой теории необходимо привлечь аппарат статистической теории опознания образов, которая давно и успешно применяется при выделении сигналов из шумов.

3. МОЖНО ЛИ РЕАЛИЗОВАТЬ В ЗЕМНЫХ УСЛОВИЯХ ГРАВИТАЦИОННЫЙ ОПЫТ ГЕРЦА?

Из изложенного выше ясно, что экспериментаторы, создающие наземные гравитационные антенны для обнаружения высокочастотных гравитационных волн или работающие над проектами спутниковых антенн для низкочастотных волн, по существу, стремятся решить сразу две проблемы: во-первых, обнаружить новую форму материи — оторвавшееся от источника поле переменного ускорения и, во-вторых, открыть новый канал астрофизической информации. По-видимому, вторая зада-

ча представляется им значительно более привлекательной, несмотря на огромное количество нерешенных вопросов и очевидную необходимость привлечения почти всего арсенала современной экспериментальной техники.

Действительно, открытие, например, высокочастотных всплесков гравитационного излучения дало бы мощный толчок в развитии наших представлений об эволюции звезд, о процессах в ядрах галактик и т. д. Здесь уместно привести оценку советского ученого, академика Гинзбурга: около двух третей фундаментальных открытий в физике за последние 20 лет сделаны благодаря успехам астрофизиков.

Тем не менее большинство теоретиков считает желательной постановку лабораторного опыта, в котором были бы использованы «передатчик» и «приемник» гравитационного излучения, иными словами, постановку опыта, аналогичного опыту Герца. В учебнике американских физиков Торна, Уилера и Мизнера приводится такой пример: предположим, что массивный стальной цилиндр (масса его $5 \cdot 10^8$ г, длина — $2 \cdot 10^3$ см, радиус — 10^2 см) приведен во вращение вокруг оси, проходящей через его центр и перпендикулярной его длинной оси. Если частота вращения около 30 рад/с (что соответствует наибольшему натяжению в цилиндре $\sim 3 \cdot 10^9$ дн/см^2, то мощность гравитационного излучения цилиндра $\dot{\varepsilon}_{гр} = 2 \cdot 10^{-27}$ эрг/с.

Рассмотрим механические излучатели другого типа. Предположим, что в нашем распоряжении имеется n одинаковых цилиндров, каждый площадью S, длиной l и с плотностью ρ, а скорость распространения звука в материале цилиндра — $v_{зв}$. Если в таких цилиндрах синхронно возбуждены механические колебания с относительной амплитудой $\xi = \Delta l / l$ на основной частоте $f_м = v_{зв}/2l$, то мощность гравитационного излучения такой системы можно вычислить с помощью следующего выражения:

$$\dot{\varepsilon}_{гр} = \frac{16}{15} \cdot \frac{G}{c^5} S^2 \xi^2 \rho^2 v_{зв}{}^6 n^2,$$

которое справедливо, если расстояние между крайними цилиндрами много меньше длины гравитационной волны $\lambda_{гр} = c/f_м$, а оси цилиндров параллельны и колебания в них строго синхронны.

Из этого выражения видно, что фактор $\rho^2 v_{зв}^6$ является величной, определяющей эффективность такого излучателя. В таблице, приведенной ниже, даны численные значения этого фактора для различных материалов и оценки $\dot{\varepsilon}_{гр}$ в предположении, что $S=10^4$ см², $\xi=10^{-4}$ и $n=10^4$.

Материал	$\rho^2 v_{зв}^6$, $г^2/c^2$	$\dot{\varepsilon}_{гр}$, эрг/с
Алюминий	$1{,}1\cdot10^{35}$	$2\cdot10^{-17}$
Сапфир	$1{,}6\cdot10^{37}$	$3{,}2\cdot10^{-15}$
Алмаз	$4\cdot10^{38}$	$8\cdot10^{-14}$
Металлический водород при давлении 100 мбар	10^{42}	$2\cdot10^{-10}$

Из этой таблицы видно, что для доступных с точки зрения современной технологии материалов (алюминия и сапфира) такой механический излучатель дает мощность гравитационного излучения на 5—7 порядков больше, чем в приведенном выше примере с вращающимся цилиндром. Важно, что эффективность излучателя будет расти, если скорость распространения звука $v_{зв}$ можно увеличить хотя бы в одном направлении.

Представим себе, что в нашем распоряжении имеется гипотетический материал с плотностью 1 г/см³ и скоростью распространения звука в одном направлении, превышающей скорость распространения звука в сапфире ($3\cdot10^8$ см/с) в 300 раз. Если из такого материала изготовить $n=10^4$ излучателей с $S=10^4$ см² и возбудить в них синхронные колебания с $\xi=10^{-4}$, то мощность гравитационного излучения такой системы составила бы $\dot{\varepsilon}_{гр}\simeq2\cdot10^{-2}$ эрг/с.

Таким образом, один из возможных путей решения задачи об эффективном источнике излучения состоит в создании твердотельных материалов, у которых по крайней мере в одном направлении скорость распространения звука существенно больше, чем у других материалов.

Оценим, какова потенциальная чувствительность механического приемника гравитационного излучения. Эту чувствительность удобно оценивать в единицах плотности потока мощности эрг/см², учитывая при этом, что излучатель может долго работать на одной частоте, а приемник (с соответствующим преобразователем) —

долго «копить» сигнал. Можно показать, что в случае длительного накопления помехи от системы регистрации, а также помехи, связанные с шумами генератора, играют значительно меньшую роль, чем броуновские флуктуации. Если ограничиться этими последними, то наименьшая плотность потока мощности гравитационного излучения I, которая может быть обнаружена, будет равна

$$I \simeq \frac{c^3 k T_м}{2\pi G m \omega_м Q_м l^2 \hat{\tau}},$$

где $T_м$ — температура антенны, масса которой примерно $3m$, добротность квадрупольной моды $Q_м$, частота колебаний в этой моде $\omega_м$, l — эффективная длина и $\hat{\tau}$ — время накопления.

Подставив в это выражение численные значения $T_м = 3 \cdot 10^{-3}$ К, $m = 10^5$ г, $l = 1$ см (частота гравитационного излучения около 0,5 мГц), время накопления $\hat{\tau} = 10^5$ с и фактор $\omega_м Q_м = 10^{21}$ с$^{-1}$ (такое значение должно быть для сапфирового резонатора при $T_м = 0{,}1$ К), то получим $I \simeq 3 \cdot 10^{-12}$ эрг/см$^2\cdot$с (!). Подчеркнем еще раз, что такой фантастически высокий уровень чувствительности получен (теоретически) в основном за счет того, что использована предельная (по Ландау) оценка фактора $\omega_м Q_м = 10^{21}$ при температуре 0,1 К. Сейчас достигнута величина $\omega_м Q_м \simeq 10^{15}$, правда, при большей температуре, около 4 К.

Оценки чувствительности $I = 3 \cdot 10^{-12}$ эрг/см$^2\cdot$с и мощности для гипотетического источника $\dot{\varepsilon}_{гр} \simeq 2 \cdot 10^{-2}$ эрг/см^2 практически согласуются (с учетом, что источник и приемник должны быть разнесены на расстояние порядка длины волны). Можно было бы и не прибегать к гипотетическому источнику, а просто резко увеличить размеры и количество излучателей из обычного алюминия и таким путем достичь плотности потока мощности гравитационного излучения порядка 10^{-12} эрг/см$^2\cdot$с. Однако расчет показывает, что создание такой установки потребовало бы примерно таких же усилий, какие нужно затратить на создание мощного современного ускорителя элементарных частиц.

Существует еще несколько проектов такого рода, принадлежащих советским ученым Грищуку и Коппви-

лему. Но и в них, к сожалению, масштабы необходимых установок слишком велики, а кроме того, для реализации этих проектов необходимо решить ряд довольно трудных технических задач.

Еще одна потенциальная возможность, облегчающая решение проблемы гравитационного опыта Герца, рассмотрена также советским ученым Соколовым. Предположим, что созданы два близких по параметрам гравитационных излучателя, размеры которых меньше длины гравитационной волны. Если расстояние между ними меньше половины длины волны и колебания в них синхронны, то нетрудно видеть, что возникнут силы, вызванные гравитационным излучением, стремящиеся сблизить излучатели, и моменты сил, стремящиеся их развернуть. Наибольший момент сил [Мом F] равен

$$[\text{Мом } F] \simeq \frac{3}{8} \cdot \frac{\dot{\varepsilon}_{\text{гр}}}{\omega_{\text{гр}}},$$

где $\omega_{\text{гр}}$ — частота излучения, $\dot{\varepsilon}_{\text{гр}}$ — мощность уединенного излучателя. Если, например, $\dot{\varepsilon}_{\text{гр}} = 10^{-6}$ эрг/с, а $\omega_{\text{гр}} = 10^{7}$ рад/с, то [Мом F]$\simeq 4 \cdot 10^{-14}$ дн·см. Такой момент сил можно надеяться обнаружить при полной массе излучателя порядка 10^4 г даже в условиях земной лаборатории. Существенно, что этот когерентный пондеромоторный эффект легко кодировать, если есть возможность контролировать разность фаз колебаний двух излучателей. Возможно, что использование этого эффекта окажется целесообразным, если будет решена задача создания материалов с большой величиной $v_{\text{зв}}$.

Измерение статического гравитационного поля на поверхности Земли

Если бы Земля была сферически однородной, высоту над уровнем поверхности Земли можно было бы определять, точно измеряя ускорение свободного падения. На каждые 10 м высоты над уровнем такой однородной «Земли» ускорение свободного падения должно было бы убывать примерно на три миллионные доли.

Однако Земля не есть шар по форме, и, кроме того, она не обладает однородностью, во всяком случае в по-

верхностном слое. Поэтому точные измерения силы тяжести (ускорения свободного падения) позволяют получать информацию о средней плотности пород в районе измерений. А средняя плотность пород есть одна из важнейших величин при поиске полезных ископаемых. На стыке геологии и физики родилась целая область исследований, которая носит название гравиметрии. Основные ее задачи очевидны: во-первых, создание приборов (гравиметров) для возможно более точного измерения силы тяжести и, во-вторых, проведение измерений силы тяжести по всей поверхности Земли. Очевидно, есть и третья задача, несколько меньшая по масштабам и стоящая особняком, а именно — не изменяется ли сила тяжести в избранном районе со временем.

В этом разделе мы кратко рассмотрим основные типы приборов, измеряющих ускорение свободного падения, — гравиметров, и оценим перспективы повышения их чувствительности.

Можно подразделить гравиметры по физическому принципу, заложенному в их конструкцию.

а) Пружинный гравиметр является одним из самых распространенных. Схематически он представляет собой очень простой прибор: эта масса, подвешенная на пружинке, и чувствительный индикатор уровня растяжения пружины (например, емкостной датчик). Если период собственных колебаний такого гравиметра равен 1 с, то относительному изменению ускорения свободного падения в 0,000001 соответствует вертикальное смещение массы, равное $2{,}5 \cdot 10^{-6}$ см. Очевидно, такие большие (относительно) смещения легко регистрировать с помощью простых емкостных датчиков. Основной недостаток пружинных гравиметров — дрейф «нуль-пункта». Из-за усталости материала пружины масса монотонно смещается вниз. Поэтому с такими гравиметрами геофизики работают обычно по замкнутому маршруту, с тем чтобы ввести поправку на смещение нуля. Для того, чтобы уменьшить влияние температуры на показания прибора, пружины изготовляются из специальных сплавов или из плавленного кварца, которые обладают малым термоэластическим коэффициентом. Кроме того, основная часть гравиметра тщательно термостабилизируется. На обычном полевом уровне сейсмических помех и при не слишком большом времени усреднения хорошие пружинные гравиметры позволяют различать

разницу в ускорении свободного падения на уровне 10^{-7}—10^{-8} относительной величины.

б) В маятниковых гравиметрах период колебаний в первом приближении однозначно связан с ускорением свободного падения и длиной маятника. Высокая стабильность частоты электромагнитного генератора, с которым сравнивается период колебаний маятника гравиметра, обеспечивает огромный резерв чувствительности. Казалось бы, достаточно изготовить стержень маятника из материала с коэффициентом теплового расширения порядка 10^{-6}—10^{-7} град$^{-1}$, термостабилизировать маятник до 10^{-4} С, и можно измерить величину ускорения свободного падения с относительной погрешностью 10^{-10}—10^{-11}. Однако это не так. Вибрация подвеса, вызванная сейсмическими помехами, влияет на период колебаний маятника и резко увеличивает время усреднения при сравнении со стабильным генератором. Кроме того, конечная амплитуда колебаний также сказывается на периоде. Поэтому маятниковые гравиметры обладают примерно таким же разрешением, что и пружинные. Интересно отметить, что пружинные и маятниковые гравиметры позволяют достаточно точно измерять изменения силы тяжести, вызванные приливными волнами в коре Земли, а также изменения, возникающие из-за колебаний плотности воздуха в районе над точкой измерений.

в) Если два описанных выше типа гравиметров применяются в основном для относительных измерений вариаций силы тяжести от точки к точке на земной поверхности, то измерение времени свободного падения тела позволяют получить абсолютное значение ускорения свободного падения. Лазерные методы измерения расстояния в соединении с точными отсчетами времени позволили достичь величины относительной погрешности в абсолютных измерениях на таких устройствах порядка 10^{-7}, а для долговременных относительных измерений — 10^{-9}. С помощью таких методов удается установить и монотонное во времени изменение ускорения силы тяжести в месте измерений. Так, например, многолетние измерения, выполненные на гравиметрической станции во Франции под Парижем, показали, что за несколько лет ускорение силы тяжести изменилось на относительную величину порядка $5 \cdot 10^{-9}$.

г) Известную популярность в последние годы приоб-

рела модификация пружинного гравиметра — гравиметр на сверхпроводящем подвесе. Схема его очень проста: вместо пружины используется замкнутая катушка со сверхпроводящим током в ней, создающим магнитное поле. Катушка охлаждена до температуры жидкого гелия. В этом магнитном поле висит (эффект Майснера) шарик, также изготовленный из сверхпроводника. Естественно, что стабильность такой «пружины» много выше, чем у обычной. Изменение упругости такой системы и дрейф положения равновесия определяются только изменением геометрических размеров катушки и шарика. При температуре жидкого гелия коэффициент теплового расширения составляет 10^{-9} град$^{-1}$. Однако до настоящего времени широкого распространения такие гравиметры пока не получили.

Подводя итог изложенному, следует сказать, что сейчас наилучшее разрешение при измерении ускорения свободного падения достигнуто на спутнике, свободном от сноса (см. выше), и гравиметристам на Земле нужно преодолеть по крайней мере еще два порядка, чтобы достигнуть этого уровня чувствительности.

Заключение

Приведенные в этом кратком обзоре описания недавно выполненных гравитационных опытов и программы новых показывают, что в настоящее время происходит бурное развитие гравитационного эксперимента. При этом привлекаются из других областей физики (физики твердого тела, радиофизики, физики низких температур) уже отработанные приемы и методы. Одновременно гравитационисты постановкой новых проблем инициируют развитие новых методов. Можно сказать, что подавляющее число экспериментаторов, работающих сейчас в области гравитации, в прошлом интенсивно занимались другими проблемами экспериментальной физики. Такое взаимное обогащение (во всяком случае методическое) естественно и желательно, особенно при современной узкой специализации. Автор надеется, что читатель, работающий в области физики или техники, далекой от гравитации, найдет в этом обзоре не только информацию о «чисто гравитационных делах», но и некоторые еще не известные ему сведения о новых достижениях в экспериментальной физике.

СОДЕРЖАНИЕ

Владимир Борисович Брагинский

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Редактор *К. А. Кутузова*. Обложка *А. С. Широкова*. Худож. редактор *М. А. Гусева*. Техн. редактор *Т. В. Пичугина*. Корректор *Н. Д. Мелешкина*.

А 03493. Индекс заказа 74001. Сдано в набор 4/X-76 г. Подписано к печати 15/XII-76 г. Формат бумаги 84×108/32. Бумага типографская № 3. Бум. л. 1. Печ. л. 2. Усл. печ. л. 3,36. Уч.-изд. л. 3,33. Тираж 75 000 экз. Издательство «Знание». 101835. Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Заказ 1745. Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4. Цена 11 коп.

Общ. „Знание"

11 коп.

Индекс 70102